

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.762 (571.56)

Мастахский разрез р. Тюнг – новый тип морской юры Вилуйской синеклизы

В.С. Гриненко*, В.Г. Князев*, В.П. Девятков**, А.А. Горячева***, Т.Е. Михайлова****

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

**Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья, г. Новосибирск

*** Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск

****Центральная поисково-съёмочная экспедиция ГУГПП РС (Я) «Якутскгеология», г. Якутск

Крупнейшая в юре раннетоярская трансгрессия на востоке Сибирской платформы и в её складчатом обрамлении (доминирующее влияние режима Арктического супербассейна, талассократический фактор) сопровождалась обширной инверсией свода Якутского погребенного поднятия и сопряженной с ним на востоке Томпонской глыбы, а также формированием вулканитов плинсбах-ааленской кобюминской свиты (проявление элементов режима Тихоокеанского супербассейна, геократический фактор). В это же время (данлапская фаза тектонической активности), в зоне сочленения Сибирской платформы и Верхоянского складчато-надвигового пояса (Ленская ветвь Предверхоянского краевого прогиба), на относительно крутом палеосклоне фрагментарно накапливается маркирующий раннетоярский глинистый горизонт Вилуйской синеклизы. При этом в Алданской ветви прогиба он полностью выпадает из разреза, а на северо-западе синеклизы, в её прибрежной зоне (бассейн р. Тюнг), установлено трансгрессивное залегание сунтарской свиты на карбонатный цоколь верхнего кембрия. Стратиграфическое несогласие на р. Тюнг доказано новыми палеонтологическими находками, а отсутствие геттанг-плинсбахских отложений и трансгрессивное залегание верхнего лейаса на верхнекембрийский карбонатный цоколь позволяет выделить новый тип разреза морской юры в Вилуйской синеклизе с названием «Мастахский».

Ключевые слова: Сибирская платформа, Верхоянский складчато-надвиговой пояс, Вилуйская синеклиза, Предверхоянский краевой прогиб, зона сочленения, Якутское поднятие, Томпонская глыба, трансгрессия, граница нижней-средней юры, мастахский тип разреза юры.

The Mastakh Section of the Tyung River – a New Type of Jurassic Marine Rocks in the Vilyui Syncline

V.S. Grinenko*, V.G. Knyazev*, V.P. Devyatov**, A.A. Goryacheva***, T.E. Mikhaylova****

*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

**Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Novosibirsk

***Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk

****Central Prospect-and-Survey Expedition of «Yakutskgeologia», Yakutsk

The largest in the Jurassic, The Early Toarcian transgression in the eastern Siberian platform and its folded framing (Arctic superbasin regime, thalassocratic factor) was accompanied by extensive inversion of

*ГРИНЕНКО Виталий Семенович – к.г.-м.н., с.н.с., grinenkovs@diamond.ysn.ru; *КНЯЗЕВ Валерий Георгиевич – д.г.-м.н., г.н.с., knyazev@diamond.ysn.ru; **ДЕВЯТОВ Владимир Павлович – д.г.-м.н., г.н.с., dvp@sniiggims.ru; ***ГОРЯЧЕВА Анна Анатольевна – к.г.-м.н., н.с., GoryachevaAA@ipgg.sbras.ru; ****МИХАЙЛОВА Татьяна Евгеньевна – вед. специалист, geopoisk@sakha.ru.

the arch of the Yakut buried uplift and the conjugate Tompo block to the east, as well as by the formation of volcanites of the Pliensbachian–Aalenian Kobyuma Suite (Pacific superbasin regime, geocratic factor). At the same time (the Danlap phase of tectonic activity) in the zone of junction of the Siberian platform and the Verkhoyansk fold-and-thrust belt (the Lena branch of the Priverkhoyansk foredeep), a key Early Toarcian clay horizon of the Vilyui syncline was locally accumulating on a relatively steep paleo-slope. The horizon is lacking in the section of the Aldan branch of the foredeep, and near the northwestern boundary of the Vilyui syncline (Tyung River basin) the Suntar Suite is found to transgressively overlie the carbonate base of the Upper Cambrian. The stratigraphic unconformity on the Tyung River is proved by new paleontological finds. The lack of Hettangian–Pliensbachian rocks and the fact that the Upper Cambrian carbonate base is transgressively overlain by the Upper Lias deposits permits establishing a new «Mastakh» type of the section of Jurassic marine rocks in the Vilyui syncline.

Key words: Siberian platform, Verkhoyansk fold-and-thrust belt, zone of junction, Vilyui syncline, Pre-verkhoyansk foredeep, Yakut buried uplift, Tompo block, transgression, Lower–Middle Jurassic, Mastakh type of section.

Введение

Возрастающий интерес к геологическому строению Вилуйской синеклизы объясняется наличием в её природном, в большей степени, погребенном разновозрастном дочетвертичном осадочном резервуаре комплекса полезных ископаемых, таких как концентрированные углеводороды, каустобиолиты, фосфориты, бокситы, железные руды, алмазы и благородные металлы, приуроченные к определённым стратиграфическим уровням и фациальным обстановкам. В этом контексте юрские образования, участвующие в формировании благоприятных условий по образованию высоколиквидных полезных ископаемых, не являются исключением. Поэтому для оптимизации поисков минерального сырья необходимо постоянно совершенствовать стратиграфическую основу и палеогеографические реконструкции рассматриваемого интервала.

Существующие проблемы и некоторые комментарии к ним

В прошлом веке [1] были установлены естественные этапы развития юрских осадочных бассейнов Сибири и северо-востока Азии: геттанг-раннеплинсбахский, позднеплинсбахский, тоар-ааленский, аален-байосский, байос-батский, бат-оксфордский. Каждый из этих этапов начинался крупным трансгрессивным и заканчивался регрессивным периодами заполнения аккумулятивных впадин. Самыми крупными в Северном полушарии по площади развития и амплитуде повышения уровня морей были раннетоарская и волжская трансгрессии, являющиеся инициальными частями циклов высокого ранга: триас-плинсбахского, тоарско-позднеюрского и волжско-мелового. Адекватность строения юрской толщи выражена в закономерном появлении на разрезах квазисинхронных пачек (свит, подсвит) существенно глинистого состава, отвечающих времени повышения уров-

ня сибирских морей и нивелировке сообществ биоты на больших территориях, что позволяет рассматривать их в качестве каркаса стратиграфического расчленения [2].

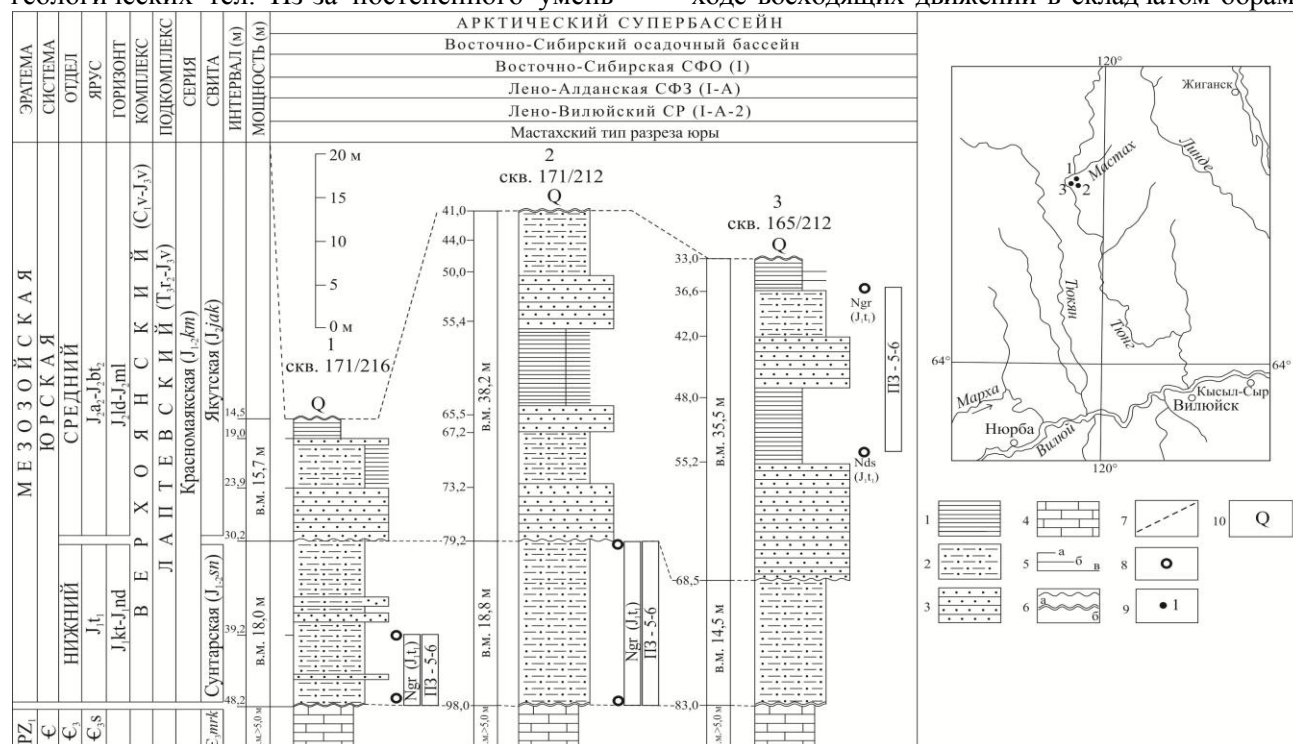
В нижней и средней юре выявлены пять маркирующих горизонтов: раннегеттангский, позднеплинсбахский, раннетоарский, раннеааленский, байосский. Раннетоарская трансгрессия, отраженная в Сибири иланской, тогурской, китербютской, сунтарской свитами и позднее выделенными их аналогами, является единственным реперным горизонтом, который прослежен от Западной Сибири до Северо-Востока Азии и далеко за их пределами [1]. Нижняя и средняя юра преимущественно морского генезиса широко развита на востоке России. В Вилуйской синеклизе и Предверхоянском краевом прогибе она представлена сероцветной терригенной толщей пород различной мощности – от первых десятков до первых сотен метров. На западе Вилуйской синеклизы юра подстилается различными горизонтами палеозоя и раннего мезозоя. На востоке, в зоне сочленения с Алданской антеклизой, она залегает на кристаллическом фундаменте (Якутское погребенное поднятие) или на карбонатных и терригенных осадочных образованиях палеозоя и мезозоя субширотной (Алданской) ветви Предверхоянского краевого прогиба. На западе северной (Ленской) ветви Предверхоянского краевого прогиба юра залегает на терригенно-карбонатных образованиях нижнего палеозоя, а восточнее – уже на терригенных триасовых отложениях. Залегание на разновозрастных породах и площадное распространение контуров юры свидетельствует о наличии на изученной территории Вилуйской синеклизы и Предверхоянского краевого прогиба расчлененного палеорельефа и о начале формирования юрской толщи на поверхности этого палеорельефа.

Длительное время дискуссионным оставался вопрос о наличии тоарских отложений в цен-

тральной части Вилюйской синеклизы, прилегающей части Предверхооянского краевого прогиба и Верхооянского складчато-надвигового пояса. Наличие обоих подъярусов тоарского яруса на восточном обрамлении Сибирской платформы было доказано новыми находками и переопределением аммонитов [3]. Последовавший вслед за этой публикацией соответствующий пересмотр возраста комплексов фораминифер В.В. Сапьяником подтвердил квазисинхронность сунтарской свиты на всей территории Вилюйской синеклизы и прилегающей части Предверхооянского краевого прогиба [1].

С точки зрения палеогеографии юрского (и более раннего) времени (углубляющегося в восточном направлении морского бассейна) возраст сунтарских глин в настоящее время рассматривается от раннетоарского (на восточном склоне платформы) до тоарско-раннеааленского (в погруженной ее части), что вполне укладывается в рамки основного закона стратиграфии – возрастной миграции граничных поверхностей геологических тел. Из-за постепенного умень-

шения мощности тоарских слоев с запада на восток и значительного объема в сунтарской свите глинистых пород аалена Ю.Л. Сластеновым в 1986 г. было предложено новое наименование этой толщи для центральной части Предверхоянского краевого прогиба – биллэхская свита. Анализ материалов картировочного поисково-разведочного и глубокого бурения на нефть и газ свидетельствует, что сунтарская свита на востоке Сибирской платформы присутствует даже в условиях редукции всех нижних горизонтов юрской системы. Одной из проблем является отсутствие глинистых возрастных аналогов сунтарской свиты в широтной (Алданской) ветви Предверхоянского краевого прогиба (рисунок). Установлены стратиграфический перерыв и фрагментарное развитие сунтарских глин в обрамлении Якутского погребенного поднятия. Вполне вероятно, что в результате инверсии свода Якутского погребенного поднятия и смежной Томпонской глыбы, а также общего падения уровня сибирских морей в конце ранней юры, в ходе восходящих движений в складчатом обрам-



Участок исследований и корреляция разрезов мастахского типа морской юры бассейна верхнего течения р. Тюнг.
Масштаб 1:500:

1 – аргиллиты и алевролиты мелкозернистые; 2 – алевролиты крупнозернистые; 3 – песчаники; 4 – известняки; 5 – внемасштабные прослои или закономерное чередование слоёв (длина линии соответствует: а – аргиллитам и алевролитам мелкозернистым, б – алевролитам крупнозернистым, в – песчаникам); 6 – перерывы в осадконакоплении (а – размывы, б – несогласия стратиграфические); 7 – границы корреляционные; 8 – места отбора образцов на палинологический анализ; 9 – буровые скважины (1 – скв. 171/216, 2 – скв. 171/212, 3 – скв. 165/212); 10 – современные образования квартера. Аббревиатура: подразделения ОСШ: E_{3s} – сакский ярус; региональные горизонты: J_{1kt} – китербютский, J_{1nd} – надояхский, J_{2ld} – лайдинский, J_{2ml} – малышевский; свиты: E_{3mrk} – моркокинская; палеонтология: диноцисты – Ngr (J_{1t1}) – слои с *Nannoceratopsis gracilis* (нижний тоар); споры и пыльца – ПЗ – 6 – палинозона 6 (нижний тоар). Примечание. Элементы районирования по [3–5 и др.], с дополнениями

лении платформы, тоарские отложения на восточном крыле Алданской ветви Предверхоянского прогиба были размыты. Предполагается также появление в это время системы островов (Дулгалахский конседиментационный палеоуступ) и формирование плинсбах-ааленских вулканитов кобюминской свиты [5]. Таким образом, граница нижней-средней юры формировалась в палеобассейне на фоне доминирующего режима Арктического супербассейна (талласократический фактор) и проявленных элементов режима Тихоокеанского супербассейна (геократический фактор) [5]. И хотя на основной рассматриваемой территории Вилуйской синеклизы сунтарская свита, в большинстве своём, залегает согласно на верхнеплинсбахских морских образованиях и перекрывается среднеюрскими отложениями, любой новый тип разреза с участием сунтарской свиты заслуживает особого внимания и детального рассмотрения при его выделении. Из литературных источников известны пять типов разрезов юры, развитых в Вилуйской синеклизе, в которых проблемы геологических тел, структуры разрезов и их генезис рассматривались в публикациях [2–6 и др.]: Сунтарский, Хапчагайский, Усть-Вилуйский, Жиганский, Алданский. Новый тип структуры разреза юры с названием «Мастахский» дополняет уже известные типовые разрезы и при этом значительно расширяет наши знания о палеогеографии морской юры, в частности, переходных слоёв морского генезиса нижней-средней юры на востоке Сибирской платформы.

Мастахский разрез р. Тюнг – новый тип морской юры Вилуйской синеклизы

Выявлен на северо-западном борту Вилуйской синеклизы. Название дано по руч. Мастах, левому притоку р. Тюнг (Западная Якутия). Типовой разрез формирует красноаякская серия ($J_{1-2}km$) [3–6], включающая местные подразделения, снизу – сунтарскую и выше по разрезу – якутскую свиты.

Сунтарская свита ($J_{1-2}sn$) развита в Мархинско-Тюнгском (Накынский, Тюкян-Тюнгский участки), а также в Муно-Линденском и Жиганском районах Вилуйской синеклизы. Стратиграфический объем: тоарский – нижняя часть ааленского ярусов [3]. Свита залегает трансгрессивно на подстилающей карбонатной верхнекембрийской моркокинской (ϵ_{3mrk}) свите (стратиграфический объем – верхняя часть сакского яруса). Изученная бурением карбонатная толща моркокинской свиты представлена пестроцветными, часто переслаивающимися известняками, доломитами, мергелями, аргиллитами и песчаниками (мощность видимая 120 м – 200 м). Фауна. Трилобиты: *Kuraspis obscura* N. Tchern.,

Paracoldinia aff. *Striata* Ros. Фаунистические остатки позволяют датировать свиту верхней частью сакского яруса. Сунтарская свита, залегающая трансгрессивно на карбонатном цоколе, в свою очередь, также трансгрессивно перекрывается среднеюрской якутской свитой. Свита изменчива по мощности и, нередко, фациально (видимая мощность 0 м – 100 м). Представлена аргиллитами, алевролитами, редкими прослоями песчаников и линзами известняков. Фауна. Двустворки: *Dacryomya inflata* (Zict.), *D. jakutica* (Petr.), *Meleagrinnella similis* (Petr.), *Pseudomytiloides marchausis* (Petr.), *Ps. sp.*, *Arctotis marchausis* (Petr.), *Oxytoma jacksoni* (Comp.). Фораминиферы: *Caccamina* sp., *Ammodiscus glumaceus* Gerke et Sossip., *Trodiammima* sp. Juv., *Hyperraminoides* sp. и др. Фаунистические остатки датируют сунтарскую свиту тоарским и нижней частью ааленского ярусов и коррелируют её с китербютским, надояхским и нижней частью лайдинского горизонтами региональной шкалы Сибири [4]. На востоке Сибирской платформы сунтарская свита повсеместно является региональной глинистой покрывкой и, как мощный природный флюидоупор, «запечатывает» структурные и неструктурные ловушки в подстилающих образованиях, при этом маркирует собой потенциально перспективный верхнетриасово-нижнеюрский газоносный горизонт, развитый в Усть-Вилуйском районе Предверхоянской СФЗ, к востоку от площади бурения [5].

Якутская свита (J_2jak) прослежена в Мархинско-Тюнгском (Накынский, Тюкян-Тюнгский участки), а также в Лено-Вилуйском, Вилуйско-Приверхоянском и Усть-Вилуйском районах [6]. Стратиграфический объем: верхняя часть ааленского – средняя часть батского ярусов. Терригенная толща сложена преимущественно песками, песчаниками, прослоями алевролитов и аргиллитов, нередко с тонкими пакетами или прослоями и линзами конгломератов, галечников и каменных углей. Свита изменчива по мощности и фациально (видимая мощность 0 м – 240 м). Фауна. Двустворки: *Arctotis* aff. *Lenaensis* (Lah.), *Arctotis* sp., *Modiolus nymismalis* Opp., *Eumorphitis lenaensis* Zah., *Captonectes* (*Barionectes*) *kelimyarensis* (Zakh. et Schurug.) и др. Фораминиферы: *Ammodiscus* aff. *Glumaceus* Gerke et. Sossip. и др. Фаунистические остатки датируют свиту ааленским – батским ярусами и коррелируют её с верхней частью надояхского – малышевским горизонтами региональной шкалы Сибири [3]. Общая мощность мастахского типа разреза, изученного на р. Тюнг, не превышает 340 м. В пределах площади бурения перекрывающих красноаякскую серию (сунтарская и якутская свиты) толщ средней-верхней юры не отмечено. Однако подобные образования присутствуют

ют на Тюкян-Тюнгском междуречье, где развиты континентальные, нередко угленосные толщи, представленные песками, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, углями с остатками флоры. Среди континентального генезиса отложений выделены и прослежены фациальные аналоги чечумской серии (J₂₋₃сч) Усть-Вилуйского района [5, 6].

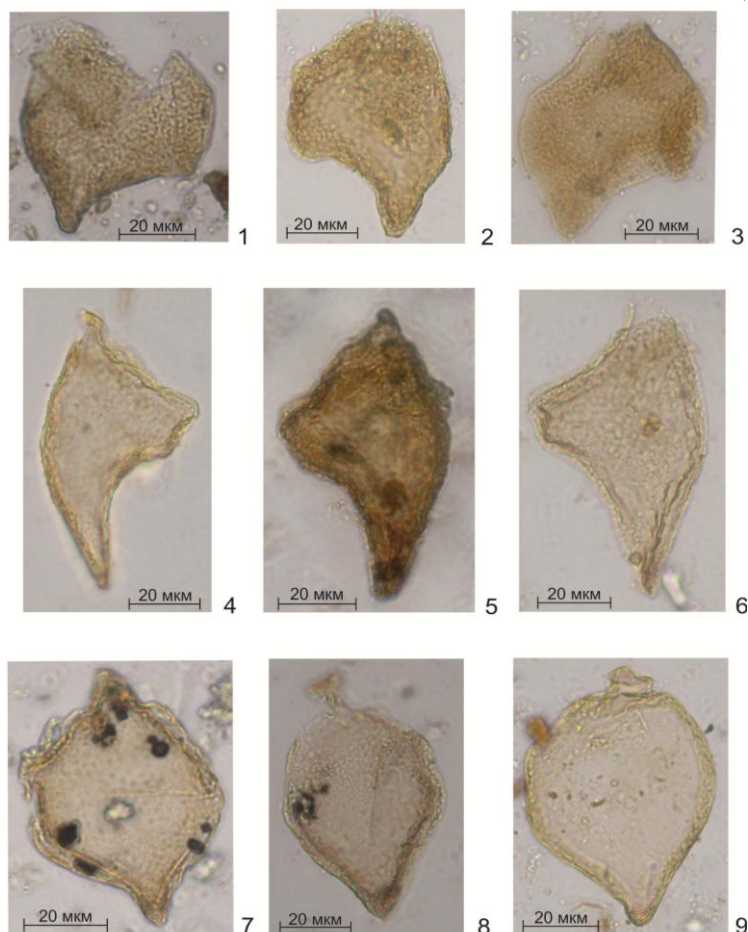
Новые палеонтологические находки

Как было отмечено ранее [1, 2], в ходе исследований вдоль северо-западного борта Вилуйской синеклизы установлено (по естественным выходам и колонковым скважинам) залегание с размывом нижнеюрских отложений в составе укугутской, тюнгской и сунтарской свит на кембрийском карбонатном цоколе. В процессе дальнейших тематических работ обнаружен участок рассматриваемой территории с залеганием трансгрессивной нижнетюарской сунтарской свиты (основания красноянской серии, по [4]) на нижнепалеозойских образованиях. Особенностью структуры нового типа разреза в северо-западной прибортовой зоне выклинивания является полное отсутствие нижнего лейаса или аномально низкие значения мощности верхнеплинбаховской тюнгской свиты и полная редукция укугутской свиты. Залегание сунтарской свиты в составе межрегионального стратиграфического китербютского горизонта на карбонатном цоколе раннего палеозоя подтверждают результаты комплексного палинологического анализа кернового материала из трех скважин (рисунок, разрезы 1, 2, 3) — скв. 171/216 (обр. 9, 12), скв. 171/212 (обр. 21, 27) и скв. 165/212 (обр. 8, 14). Из проб керна Т.Е. Михайловой были изучены палиноморфы наземной растительности и определен единый спорово-пыльцевой комплекс широкого стратиграфического диапазона (СПК) с доминированием двухмешковой пыльцы хвойных и спор цистейных папоротников, присутствием спор теплолюбивых растений — иммигрантов из Евро-Синийской фитогеографической области и заметным участием монотрихальной пыльцы гинкговых.

Установленный СПК обладает чертами, характерными для зональных комплексов палионостратиграфической шкалы Сибири, характеризующих палинозону 5 — *Tripartina variabilis* и палинозону 6 — *Cyathidites* spp., *Dipteridaceae*, *Marattisporites scabratus*, *Klukisporites variegatus*, *Classopollis*,

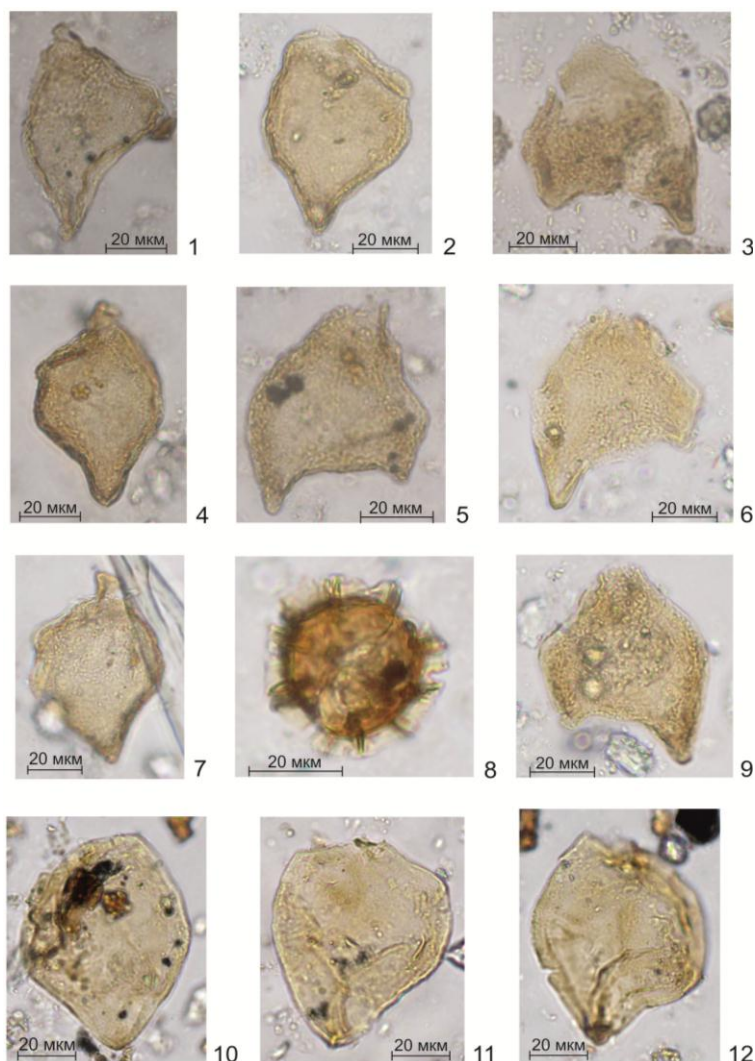
что дает возможность ограничить стратиграфический интервал вмещающих отложений верхами верхнего плинсбаха — нижним тоаром [1]. Кроме наземных палиноморф образцы керна содержали микрофитопланктон, детально проанализированный А.А. Горячевой. В районе исследований в образцах из сунтарской свиты группа микрофитопланктона обнаружена впервые и представлена диноцистами, акритархами, празиофитами и зигнемовыми. В результате получены новые данные, дополняющие уже существующие сведения по биоистратиграфии и палеогеографии тоара в Восточной Сибири [1, 7], в том числе по Вилуйской синеклизе и складчатому обрамлению Сибирской платформы [2–3 и др.]. Здесь на р. Тюнг впервые установлены два биоистратона в ранге слоев с диноцистами (табл. 1–2).

Т а б л и ц а 1



Примечание. 1 — *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 1 (171/216), обр. 12, гл. 48,2 м; 2 — *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 1 (171/216), обр. 9, гл. 39,2 м; 3 — *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 1 (171/216), обр. 12, гл. 48,2 м; 4, 6 — *Nannoceratopsis plegas* Drugg, скв. № 1 (171/216), обр. 9, гл. 39,2 м; 5 — *Nannoceratopsis plegas* Drugg, скв. № 2 (171/212), обр. 21, гл. 79,2 м; 7 — *Nannoceratopsis* sp., скв. № 2 (171/212), обр. 21, гл. 79,2 м; 8, 9 — *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina, скв. 1 (171/216), обр. 9, гл. 39,2 м.

Таблица 2



Примечание. 1 – *Nannoceratopsis deflandrei* Evitt, скв. № 2 (171/212), обр. 27, гл. 98 м; 2 – *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina, скв. № 2 (171/212), обр. 27, гл. 98 м; 3 – *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 2 (171/212), обр. 27, гл. 98 м; 4 – *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina, скв. № 2 (171/212), обр. 27, гл. 98 м; 5 – *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 3 (165/212), обр. 8, гл. 36 м; 6 – *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 3 (165/212), обр. 8, гл. 36 м; 7 – *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina, скв. № 3 (165/212), обр. 8, гл. 36 м; 8 – *Pterospermella* sp., скв. № 3 (165/212), обр. 8, гл. 36 м; 9 – *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 3 (165/212), обр. 8, гл. 36 м; 10, 11 – *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina, скв. № 3 (165/212), обр. 14, гл. 54 м; 12 – *Nannoceratopsis gracilis* Alberti, скв. № 3 (165/212), обр. 14, гл. 54 м.

Слои с *Nannoceratopsis deflandrei senex*. Скв. 165/212. Обр. 14, гл. 54 м. Диноцисты *Nannoceratopsis deflandrei senex* (Van Helden) Iljina (доминирует), *Nannoceratopsis deflandrei* Evitt, *Nannoceratopsis plegas* Drugg, *Nannoceratopsis* sp., *Mendicodinium* sp., *Wallodinium* sp., *Fromea* sp., акритархи *Micrhystridium* sp., *Leiofusa jurassica* Cookson et Eisenack, празиофиты *Tas-*

manites sp., *Leiosphaeridia* sp., *Cymatiosphaera* sp. и зигнемовые *Ovoidites* sp. Стратиграфический интервал – нижний тоар. Данный биостратон выделен в объеме акме вида-индекса. Верхняя граница проводится по первому появлению *Nannoceratopsis gracilis* Alberti. Ранее этот биостратон был установлен на севере Восточной Сибири в обнажениях на р. Келимяр с аммонитами *Harpoceras falciferum* и комплексом фораминифер, характерных для зоны JF 11 – *Ammobaculites lobus*, *Trochammina kisselmani* (нижний тоар, аммонитовая зона *Harpoceras falciferum* – низы зоны *Dactylioceras commune*) [7, 8].

Слои с *Nannoceratopsis gracilis*. Скв. 171/216, обр. 12, гл. 48,2 м и обр. 9, гл. 39,2 м; скв. 171/212, обр. 27, гл. 98 м и обр. 21, гл. 79,2 м; скв. 165/212, обр. 8, гл. 36 м. Диноцисты *Nannoceratopsis deflandrei*, *Nannoceratopsis gracilis*, *Nannoceratopsis deflandrei senex*, *Nannoceratopsis plegas*, *Nannoceratopsis* sp., ? *Kallosphaeridium* sp., празиофиты *Cymatiosphaera* sp., *Leiosphaeridia* sp., *Tasmanites* sp., *Pterospermella* sp. и зигнемовые *Ovoidites* sp. Стратиграфический интервал – нижний тоар. Ранее этот биостратон был определен на севере Восточной Сибири в объеме верхней части фораминиферовой зоны JF 11 и низов фораминиферовой зоны JF 12 [7, 8]. Нижняя граница биостратона проводится по появлению вида-индекса, а верхняя – по акме *Pallocysta eumekes* Dörhöfer et Davies. В данном случае верхняя граница биостратона не определена.

Выводы

1. На северо-западном борту Виллюйской синеклизы впервые выделен мастахский тип разреза морской юры, залегающий трансгрессивно подошвой непосредственно на верхнекембрийском карбонатном цоколе. Разрез формирует красноаякская серия в объеме сунтарской и якутской свит. Сунтарская свита, являясь региональным флюидоупором Сибирской платформы, в бассейне р. Тунг запечатывает локально нижний (более 2 км мощности), рифейско-нижнепалеозойский, преимущественно карбонатный структурный этаж Виллюйской синеклизы.

2. Впервые в сунтарской свите на востоке Сибирской платформы установлена группа микрофитопланктона (диноцисты, акритархи, празио-

нофиты и зигнемовые). В свите в ранге слоев впервые выделены два региональных биостратона: **слой с *Nannoceratopsis deflandrei senex* и слой с *Nannoceratopsis gracilis***. Они характеризуют нижние слои геологического тела, которые на востоке Сибирской платформы и в её складчатом обрамлении коррелируются с китербютским горизонтом региональной шкалы Сибири. Для уточнения положения изученного интервала в региональных (унифицированных) и корреляционных стратиграфических схемах необходимо дальнейшее развитие подобных исследований.

3. Результаты исследований, объём имеющихся стратиграфо-палеонтологических, палеогеографических, геолого-геофизических данных и аналогии с хорошо изученными регионами Сибирской платформы обязывают специалистов обратить внимание на новый тип разреза морской юры и, по всей вероятности, пересмотреть существующие «отрицательные» выводы об условиях формирования залежей концентрированных углеводородов в северо-западной прибрежной зоне Вилюйской синеклизы. При этом перспективная корректировка комплекса дальнейших поисковых работ на нефть и газ на р. Тюнг, на взгляд авторов, достаточно объёмно геологически обоснована.

Работа выполнена в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН на 2014–2016 гг.

Литература

1. Девятков В.П., Князев В.Г., Сапьяник В.В. Реперные горизонты в нижней и средней юре Сибири // Региональная стратиграфия нефтегазоносных районов

Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. – С. 53–60.

2. Кирина Т.И., Месезжников М.С., Ретин Ю.С. О новых местных подразделениях в юре Западной Якутии // Новые данные по стратиграфии и фауне юры и мела Сибири. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1978. – С. 70–85.

3. Князев В.Г., Гриненко В.С., Девятков В.П. и др. Региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточной Якутии // Отечественная геология. – 2002. – № 4. – С. 73–80.

4. Гриненко В.С., Князев В.Г. Лаптевский подкомплекс (Т₃Г₂–J₃В) верхоянского терригенного комплекса // Наука и образование. – 2012. – № 4. – С. 13–18.

5. Гриненко В.С. История формирования верхнетриасовых-юрских отложений Восточно-Сибирского осадочного бассейна (восток Сибирской платформы и складчатое обрамление): Автореф. дис...к.г.-м.н. – Иркутск, 2010. – 19 с.

6. Гриненко В.С., Князев В.Г. Стратиграфия юрских отложений Хапчагайского и Лено-Вилюйского районов: расчленение и межрегиональная корреляция // Отечественная геология. – 2008. – № 5. – С. 72–78.

7. Горячева А.А. Микрофитофоссилии нижней и средней юры Сибири: биостратиграфия и биофациальный анализ: Автореф. дис. ...к.г.-м.н. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2014. – 22 с.

8. Гриненко В.С., Князев В.Г., Горячева А.А. и др. Новые палеонтологические находки в нижней юре северо-западного борта Вилюйской синеклизы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, 31 марта – 2 апреля 2015 г. / Отв. ред. А.Я. Биллер. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2015. – С. 131–137.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 551.72:551.432.83 (551.56-12)

Геохимия органического вещества рифейских отложений востока Алданской антеклизы

А.Ф. Сафронов, О.Н. Чалая, И.Н. Зуева, Ю.С. Гляднецова,
С.Х. Лифшиц, А.Р. Александров

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

Проведено изучение органического вещества пород рифейских отложений востока Алданской антеклизы, которым отводится важная роль в формировании скоплений углеводородов. Определено

САФРОНОВ Александр Федотович – д.г.-м.н., член-корр. РАН, директор, a.f.safronov@prez.ysn.ru; ЧАЛАЯ Ольга Николаевна – к.г.-м.н., зав. лаб., o.n.chalaya@ipng.ysn.ru; ЗУЕВА Ираида Николаевна – к.х.н., в.н.с., i.n.zueva@ipng.ysn.ru; ГЛАЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна – к.х.н., в.н.с., geochemlab@ipng.ysn.ru; ЛИФШИЦ Сара Хаимовна – к.х.н., в.н.с., s.h.lifshits@ipng.ysn.ru; АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович – н.с., popeg@ipng.ysn.ru.

нофиты и зигнемовые). В свите в ранге слоев впервые выделены два региональных биостратона: **слой с *Nannoceratopsis deflandrei senex* и слой с *Nannoceratopsis gracilis***. Они характеризуют нижние слои геологического тела, которые на востоке Сибирской платформы и в её складчатом обрамлении коррелируются с китербютским горизонтом региональной шкалы Сибири. Для уточнения положения изученного интервала в региональных (унифицированных) и корреляционных стратиграфических схемах необходимо дальнейшее развитие подобных исследований.

3. Результаты исследований, объём имеющихся стратиграфо-палеонтологических, палеогеографических, геолого-геофизических данных и аналогии с хорошо изученными регионами Сибирской платформы обязывают специалистов обратить внимание на новый тип разреза морской юры и, по всей вероятности, пересмотреть существующие «отрицательные» выводы об условиях формирования залежей концентрированных углеводородов в северо-западной прибрежной зоне Вилюйской синеклизы. При этом перспективная корректировка комплекса дальнейших поисковых работ на нефть и газ на р. Тюнг, на взгляд авторов, достаточно объёмно геологически обоснована.

Работа выполнена в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН на 2014–2016 гг.

Литература

1. Девятков В.П., Князев В.Г., Сапьяник В.В. Реперные горизонты в нижней и средней юре Сибири // Региональная стратиграфия нефтегазоносных районов

Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. – С. 53–60.

2. Кирина Т.И., Месезжников М.С., Ретин Ю.С. О новых местных подразделениях в юре Западной Якутии // Новые данные по стратиграфии и фауне юры и мела Сибири. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1978. – С. 70–85.

3. Князев В.Г., Гриненко В.С., Девятков В.П. и др. Региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточной Якутии // Отечественная геология. – 2002. – № 4. – С. 73–80.

4. Гриненко В.С., Князев В.Г. Лаптевский подкомплекс (Т₃Г₂–J₃В) верхоянского терригенного комплекса // Наука и образование. – 2012. – № 4. – С. 13–18.

5. Гриненко В.С. История формирования верхнетриасовых-юрских отложений Восточно-Сибирского осадочного бассейна (восток Сибирской платформы и складчатое обрамление): Автореф. дис...к.г.-м.н. – Иркутск, 2010. – 19 с.

6. Гриненко В.С., Князев В.Г. Стратиграфия юрских отложений Хапчагайского и Лено-Вилюйского районов: расчленение и межрегиональная корреляция // Отечественная геология. – 2008. – № 5. – С. 72–78.

7. Горячева А.А. Микрофитофоссилии нижней и средней юры Сибири: биостратиграфия и биофациальный анализ: Автореф. дис. ...к.г.-м.н. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2014. – 22 с.

8. Гриненко В.С., Князев В.Г., Горячева А.А. и др. Новые палеонтологические находки в нижней юре северо-западного борта Вилюйской синеклизы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, 31 марта – 2 апреля 2015 г. / Отв. ред. А.Я. Биллер. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2015. – С. 131–137.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 551.72:551.432.83 (551.56-12)

Геохимия органического вещества рифейских отложений востока Алданской антеклизы

А.Ф. Сафронов, О.Н. Чалая, И.Н. Зуева, Ю.С. Гляднецова,
С.Х. Лифшиц, А.Р. Александров

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

Проведено изучение органического вещества пород рифейских отложений востока Алданской антеклизы, которым отводится важная роль в формировании скоплений углеводородов. Определено

САФРОНОВ Александр Федотович – д.г.-м.н., член-корр. РАН, директор, a.f.safronov@prez.ysn.ru; ЧАЛАЯ Ольга Николаевна – к.г.-м.н., зав. лаб., o.n.chalaya@ipng.ysn.ru; ЗУЕВА Ираида Николаевна – к.х.н., в.н.с., i.n.zueva@ipng.ysn.ru; ГЛАЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна – к.х.н., в.н.с., geochemlab@ipng.ysn.ru; ЛИФШИЦ Сара Хаимовна – к.х.н., в.н.с., s.h.lifshits@ipng.ysn.ru; АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович – н.с., popeg@ipng.ysn.ru.

содержание C_{org} в породах, выход хлороформенного битумоида (ХБ), изучен структурно-групповой состав ХБ методом ИК-Фурье спектроскопии, установлено содержание масел, смол и асфальтенов в ХБ. Для отдельных образцов были проведены детальные исследования индивидуального углеводородного состава с применением газо-жидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии, позволяющие идентифицировать индивидуальные углеводороды, определять присутствие и особенности распределения молекул-биомаркеров. Рассмотрен характер распределения содержания органического углерода и хлороформенных битумоидов по разрезу средне-позднерифейских отложений (от малгинской до игниканской свит). Установлено, что битумоиды характеризуются алифатическим составом, однотипным характером распределения молекул-биомаркеров и отсутствием в их составе 12- и 13-метилалканов (за исключением одного образца). Большие вариации в групповом компонентном составе ХБ указывают на присутствие в разрезе средне-позднерифейских отложений гаммы битуминозных разностей: сингенетических, параавтохтонных и остаточных битумоидов и рассматриваются как свидетельство происходивших процессов эмиграции углеводородов. Высокой битуминозностью по сравнению с вышележащими свитами отличаются породы верхней части малгинской свиты, которая по геохимическим параметрам органического вещества и ХБ отнесена к нефтематеринским. Присутствие в разрезе свиты параавтохтонных битумоидов указывает на то, что нефтематеринские породы реализовывали свой генерационный потенциал.

Ключевые слова: рифейские отложения, органическое вещество, хлороформенный битумоид, групповой состав, углеводороды, биомаркеры.

Geochemistry of Organic Matter of Rephean Sediments, East of the Aldan Anticline

A.F. Safronov, O.N. Chalaya, I.N. Zueva, Yu.S. Glyaznetsova, S.H. Lifshits, A.R. Alexandrov

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk

The Rephean sediments of East of the Aldan anticline are believed to have important significance for formation of hydrocarbons accumulations. The organic matter of Rephean sediments study has been made. Corg content in rocks as chloroform bitumoids yield has been determined. Structure-group composition of bitumoids has been studied by FT-IR spectroscopy. The quantity of hydrocarbons, resins and asphaltenes has been detected. Some samples have been studied by methods of gas-liquid chromatography and chromatograph-mass-spectrometry for identification of individual hydrocarbons and study of molecule-biomarkers. Distribution character of organic carbon and chloroform bitumoids content along the section of Middle-Later Rephean sediments had been analyzed (from Malginskaya to Ignikanskaya suites). It has been defined that the bitumoids have aliphatic composition, close distribution of hydrocarbons-biomarkers and absence of 12- and 13-methylalkanes (with the exception one sample). Significant variations of hydrocarbons, resins and asphaltenes content in bitumoids composition show presence of different bitumoids (autochthonous, paraautochthonous and mixed) and evidence of hydrocarbons migration processes. The Malginskaya formation (namely Upper part) is the most bituminous in comparison with the upper lied formations. According to geochemical parameters of organic matter and bitumoids the Malginskaya formation is concerned as oil-produced. Evidence of paraautochthonous bitumoids indicates the realization of oil-generating potential of the rocks.

Key words: Rephean sediments, organic matter, chloroform bitumoid, hydrocarbons, biomarkers.

Рифейские и вендские отложения востока Сибирской платформы рассматриваются рядом исследователей как источники генерации и поступления углеводородов (УВ) в зоны нефтегазоаккумуляции. Решающая роль в формировании скоплений УВ отводится нефтематеринским формациям рифея, в которых присутствуют высокоуглеродистые толщи значительной мощности [1–3].

Материал и методика исследований

Изученные образцы (19) отобраны из рифейских отложений малгинской, ципандинской, лахандинской и игниканской свит по обнажениям р. Мая у пос. Ципанда и её притокам: Большой и Малый Канедык, ниже ручья Ингили и у скалы Малгина.

Геохимические исследования выполнены по схеме, разработанной ВНИГРИ, ВНИГНИ,

СНИИГГиМС [4–6]. Также для отдельных образцов были проведены детальные исследования индивидуального углеводородного состава с применением газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) и хромато-масс-спектрометрии (ХМС), позволяющие идентифицировать, определять состав и особенности распределения молекул-биомаркеров.

Были определены следующие геохимические параметры:

- содержание органического углерода в породе ($C_{орг}$);
- содержание хлороформенного битумоида (ХБ) методом горячей экстракции;
- групповой (компонентный) состав битумоида методом адсорбционной колоночной хроматографии;
- структурно-групповой состав ХБ методом ИК-Фурье спектроскопии;
- состав и распределение насыщенных УВ (н-алканов, изоалканов, изопреноидов) методом ГЖХ и ХМС.

Результаты и их обсуждение

Малгинская свита среднего рифея мощностью от 100 до 300 м распространена в бассейнах рек Мая и Учур (Учуро-Майская впадина). Свита состоит из двух резко различающихся по литологии толщ. Верхняя её часть представлена чёрными битуминозными тонкоплитчатыми известняками, чередующимися с листоватыми чёрными сланцами. Этот битуминозный горизонт мощностью 15–30 м подстилается пестроокрашенными известняками нижней (основной) части свиты.

Обогащённые органическим веществом (ОВ) битуминозные (доманикоидные) породы малгинской свиты многими исследователями рассматриваются как нефтематеринские [3, 7–9]. В разрезе свиты у скалы Малгина (р. Мая) мощность доманикоидной пачки составляет 14 м. Снизу вверх в её составе выделяются массивные микрозернистые светло-серые битуминозные известняки, изредка с кавернами, заполненными вязким темно-коричневым битумом. Выше по разрезу отмечено переслаивание массивных, серых, микрозернистых известняков с тонкоплитчатыми темно-серыми до черных глинистыми известняками.

Геохимическая характеристика образцов дана в таблице и на рис. 1. Содержание $C_{орг}$ в породах составляет от 0,7 до 6–9%, в прослоях горючих сланцев – 13,7–15,0% [8]. В широком интервале изменяется и выход ХБ на породу: от следов до 0,136–0,278% и более высоких значений 0,440–0,530%. Это более чем на порядок превышает содержание ХБ в породах вышележащих свит – ципандинской, лахандинской и

игниканской. Установлено, что породы малгинской свиты погружались на глубины до 3000 м и ОВ могло достигать высоких стадий катагенеза ($МК_2$) и было способно генерировать жидкие и газообразные УВ.

В составе ХБ преобладают смолистые компоненты, на долю масел приходится 13,6–37,7%, асфальтенов – 3,8–25,5%. Исключение составляет один образец (аргиллит) с содержанием масел до 73%. Для изученных образцов характерна высокая алифатичность УВ.

В метаново-нафтенной фракции преобладают н-алканы с доминированием относительно низкомолекулярных гомологов с максимумом распределения на $nC_{16,17}$. Низкие значения отношений изопреноиды/н-алканы, а также пристан/н-гептадекан и фитан/н-октадекан указывают на хорошую сохранность УВ. Обращает внимание присутствие в небольших концентрациях 12- и 13-метилалканов в одном из образцов малгинской свиты. В составе полициклических УВ повышенное содержание трисноргопана и пониженное – моретанов. В составе стеранов преобладает холестеран C_{27} . Подобный состав насыщенных УВ свидетельствует об аквагенной природе исходного ОВ, формировавшегося в восстановительной обстановке осадконакопления и диагенеза без влияния сероводородного заражения.

Геохимическая характеристика органического вещества пород и ХБ рифейских отложений по р.Мая

Параметры	Средний рифей		Верхний рифей	
	малгинская свита	ципандинская свита	лахандинская свита	игниканская свита
$C_{орг}, \%$	0,70–9,35	2,74–5,29	1,00–1,66	1,50–4,80
$\alpha\chi\delta, \%$	Сл.–0,53	Сл.–0,025	0,030	0,007–0,267
$\beta\chi\delta, \%$	0,40–8,20	Сл.–0,90	1,81–3,00	1,81–17,64
Групповой состав ХБ, %:				
масла	13,6–37,7	39,8	50,2–55,3	37,5–42,4
Σ смол	54,5–70,6	49,3	42,7–46,9	48,8–54,9
асфальтены	3,8–25,5	10,8	2,7–2,9	2,7–13,8
УВ-состав ХБ, % на Σ УВ: М-Н	63,2–87,6	Не опр.	75,7–81,2	Не опр.
Н-А	17,7–36,8	«	19,8–24,3	«
Σ н.к.- $nC_{20}/\Sigma nC_{21-k.k.}$	1,44–3,98	0,95	Не опр.	0,69–1,12
Максимум н-алканов	nC_{16-18}	nC_{18-24}	«	nC_{14-19}
Коэффициент нч/ч	0,93–1,14	0,95	«	0,79–1,02
Изопреноиды/н-алканы	0,09–0,14	0,15	«	0,10–0,21
Пристан/фитан	1,19–2,47	1,17	«	0,83–1,04
Пристан/ nC_{17}	0,20–0,32	0,67	«	0,37–0,54
Фитан/ nC_{18}	0,09–0,29	0,50	«	0,33–0,62

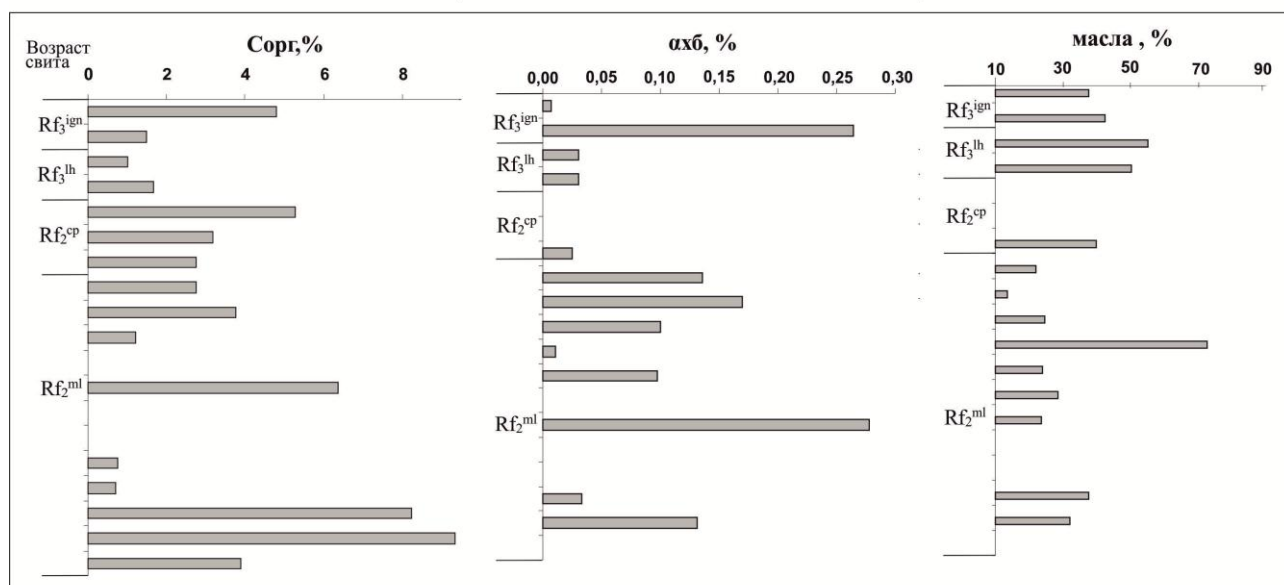


Рис. 1. Изменение геохимических параметров РОВ пород по разрезу рифейских отложений

Значительные различия в распределении концентраций ХБ и их групповом компонентном составе указывают на присутствие в разрезе свиты автохтонных и параавтохтонных битумоидов и могут рассматриваться как свидетельство происходивших процессов первичной миграции генерированных УВ из нефтематеринских пород. Это подтверждается и данными структурно-группового состава ХБ, в химической структуре которых широко варьирует соотношение между содержанием алифатических структур, ароматических циклов и количеством кислородсодержащих групп и связей.

Ципандинская свита среднего рифея, согласно залегающая на малгинской, практически целиком сложена доломитами. Мощность свиты в среднем течении р. Мая 370 м.

В средней части разреза отмечаются редкие прослои (0,8–1,2 м) битуминозных разностей с высоким содержанием S_{org} (2,7–5,3%). Выход ХБ в породах от следов до средних значений 0,025%. В групповом составе ХБ доминируют асфальтово-смолистые компоненты (таблица). Содержание масел составляет 39,8%, что выше среднего значения по малгинской свите (25,8%). В структурно-групповом составе ХБ алифатические соединения преобладают над ароматическими циклами (рис.2).

В углеводородном составе ХБ доминируют алканы нормального строения, в которых относительно низко- и высокомолекулярные гомологи содержатся практически в равных количествах. Максимум распределения н-алканов несколько сдвинут в высокомолекулярную об-

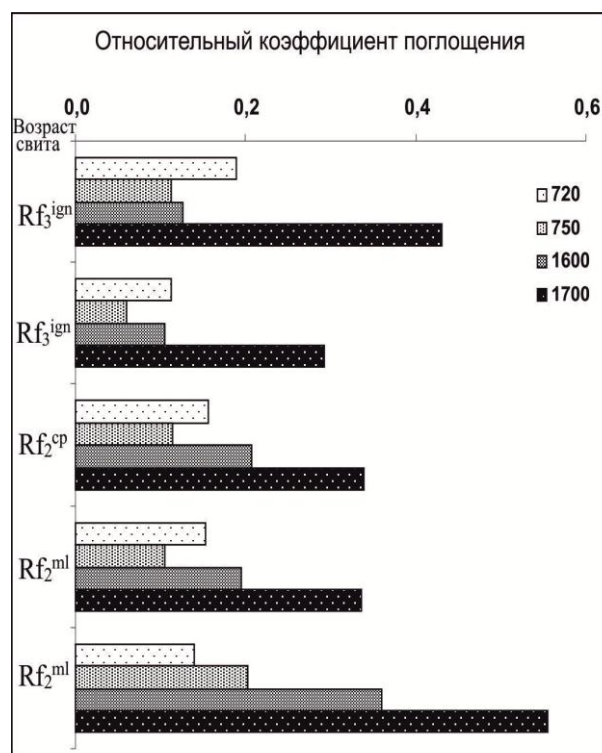


Рис. 2. Спектральная характеристика ХБ РОВ пород рифейских отложений.

Обозначения: K₇₂₀ – относительный коэф. поглощения СН₂-групп в длинных метиленовых цепях; K₇₅₀ – относительный коэф. поглощения С-Н-связей в ароматических циклах; K₁₆₀₀ – относительный коэф. поглощения С=С-связей в ароматических циклах; K₁₇₀₀ – относительный коэф. поглощения С=О-связей в кислотах, кетонах и сложных эфирах

ласть nC_{18-24} . Н-алканы преобладают над изопреноидами. Терпановые УВ, как и в малгинской свите, характеризуются значительным содержанием трицикланов (15%), преобладанием гопа на над адиантаном, соотношением гомогопанов C_{35}/C_{34} меньше 1, преобладанием трисноргопана над триснорнеогопаном ($Ts/Tm=0,27$).

Лахандинская серия позднего рифея представлена 4 свитами: кумахинской, мельконской, нельканской, игниканской, сложена пестрым комплексом терригенных и карбонатных пород.

В породах *лахандинской и игниканской свит* максимальное содержание $C_{орг}$ достигает 4,8% при колебаниях в интервале от 1,0 до 1,7%. В целом содержание $C_{орг}$ ниже по сравнению с образцами из ципандинской и малгинской свит. Породы существенно различаются по выходу ХБ от 0,007 до 0,265% (таблица).

ОВ пород лахандинской свиты претерпело более высокую степень катагенетической преобразования по сравнению с малгинской [10]. На это может указывать и групповой компонентный состав битумоидов с низким содержанием асфальтенов и более высоким – масел до 55,3% с преобладанием метаново-нафтовых УВ (81,2%).

Индивидуальный состав и характер распределения насыщенных УВ обнаруживает близкое сходство с ХБ нижележащих свит. Некоторые различия в распределении н-алканов обусловлены, вероятно, присутствием миграционных битуминозных разностей.

По данным [11], для полициклических УВ характерно преобладание терпановых УВ, а в их составе трицикланов. В составе гопа на над триснорнеогопаном. Стераны характеризуются высокими концентрациями прегнанов и близкими содержаниями стеранов C_{27} и C_{29} . Такой характер распределения полициклических УВ свидетельствует о формировании ОВ в обстановке восстановительных условий диагенеза.

Выводы

Все изученные битумоиды по разрезу средне-позднерифейских отложений (от малгинской до игниканской свит) характеризуются алифатическим составом и однотипным характером распределения молекул-биомаркеров. Присутствие в разрезе изученных отложений высокоуглеродистых толщ значительной мощности, уровень катагенетического преобразования ОВ которых отвечает условиям главной зоны нефтеобразования, позволяет отнести рассматриваемые отложения к нефтематеринским. В сапропелевых

мергелях и глинистых сланцах малгинской свиты содержание $C_{орг}$ сопоставимо с таковым для доманикоидных горизонтов. Породы характеризуются высокой битуминозностью по сравнению с вышележащими свитами. Малгинская свита может рассматриваться как нефтематеринская с более высоким генерационным потенциалом и послужившая источником формирования скоплений УВ.

Большие вариации в содержании масел и асфальтово-смолистых компонентов в групповом компонентном составе ХБ можно рассматривать как присутствие в разрезе средне-позднерифейских отложений различных битуминозных разностей – автохтонных, параавтохтонных и остаточных битумоидов и свидетельство происшедших процессов эмиграции генерированных УВ из нефтематеринских пород.

Литература

1. Старников А.И. Юдомская серия севера Юдомско-Майского прогиба // Стратиграфия позднего докембрия и раннего палеозоя Средней Сибири. Юго-западное обрамление Сибирской платформы. – Новосибирск, 1983. – С.61–73.
2. Каширцев В.А. Органическая геохимия нафтидов Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. – 160 с.
3. Баженова Т.К., Дахнова М.В., Можегова С.В. Верхний протерозой Сибирской платформы – основной источник нефтегазоносности её домезозойского мегабассейна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т.6, №2. – http://www.ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf.
4. Рыбак Б.М. Анализ нефтей и нефтепродуктов. – М.: Гостоптехиздат. 1962. – 596 с.
5. Руководство по анализу битумов и рассеянного органического вещества горных пород. – Л.: Недра, 1966. – 315 с.
6. Современные методы исследования нефтей. – Л.: Недра, 1984. – 427 с.
7. Илюхин Л.Н. Литология и коллекторские свойства верхнепротерозойских отложений юго-восточной части Сибирской платформы: Автореф. дис...к.г.-м.н. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 21 с.
8. Соболев П.Н. Геохимия доманикитной малгинской свиты Юдомо-Майской впадины. – Новосибирск: СНИИГиМС, 1987. – С. 69–76.
9. Шишкин Б.Б., Берилко Г.А., Соболев П.Н. и др. Строение и перспективы нефтегазоносности Алдано-Майской впадины // Нефтегазовая геология. – 2010. – С. 26–40.
10. Лобзакова Т.В., Баженова Т.К., Бочковская А.Б. и др. Органическое вещество нефтегазоматеринских формаций кембрия и верхнего докембрия востока Сибирской платформы, его генетическая природа и история преобразования // Геология и геохимия нефтегазоносных

и угленосных районов Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – С. 86–98.

11. Тимошина И.Д., Конторович А.Э., Ноговицин К.Е. Состав углеводородов-биомаркеров в породах лахан-

динской серии (рифей) на востоке Сибирской платформы // Успехи органической геохимии. – Новосибирск, 2010. – С. 333–337.

Поступила в редакцию 02.07.2015

553.981:622(571.56-15)

О возможности совместного освоения запасов газа из традиционных коллекторов и плотных пород на месторождениях Хапчагайского нефтегазоносного района

В.С. Ситников*, К.А. Павлова*, А.В. Погодаев**, В.Б. Черненко***

**Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск*

***ОАО «Якутскгеофизика», г. Якутск*

****ОАО «Сахатранснефтегаз», г. Якутск*

Рассмотрены общие сведения об использовании на практике работ на нефть и газ относительно нового понятия «трудноизвлекаемые ресурсы углеводородного сырья». На примере Хапчагайского нефтегазоносного района, приуроченного к одноименному сводовому поднятию первого порядка в восточной части Вилюйской синеклизы, приведены факты, которые однозначно указывают на наличие гидродинамической связи ранее выявленных газовых залежей в мезозойских и верхнепермских отложениях. Охарактеризованы аргументы, учитываемые в дискуссии о возможном наличии в разрезе верхней перми крупнейшей газовой залежи массивного типа, контролируемой Хапчагайским поднятием. Предложена условная модель возможного совместного освоения запасов газа в традиционных коллекторах и прогнозируемых ресурсов в более глубоких горизонтах чехла, сложенных плотными слабопроницаемыми породами. Даны рекомендации по широкому применению предлагаемого методического подхода в осадочных отложениях разного возраста и литологического состава, в том числе на месторождениях Вилюйской нефтегазоносной области в целом и за ее пределами.

Ключевые слова: газ, нефть, синеклиза, поднятие, запасы, ресурсы, методика, освоение, извлечение.

On the Possibility of Joint Development of Gas Reserves from Traditional Collectors and Solid Rocks at Khapchagaysky Petroleum District Deposits

V.S. Sitnikov*, K.A. Pavlova**, A.V. Pogodaev**, V.B. Chernenko***

**Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk*

***JSC «Yakutskgeofizika», Yakutsk*

****JSC «Sakhatransneftegaz», Yakutsk*

General information about using in works for oil and gas a relatively new concept of «hard-to-recover hydrocarbon resources» is considered. The facts showing the existence of the hydrodynamic connectivity of previously identified gas deposits in the Mesozoic and Upper Permian sediments for Khapchagaysky petroleum district dedicated to the eponymous arched uplift of the first order in the eastern part of Vilyui syncline, are presented. The arguments which can be taken into account in discussions about the possible existence of the largest gas deposit of a massive type in the section of the Upper Permian, controlled by Khapchagaysky

*СИТНИКОВ Вячеслав Стефанович – д.г.-м.н., зав. лаб., sitgeo@mail.ru; *ПАВЛОВА Капитолина Алексеевна – м.н.с., pavlova_kapitolina@mail.ru; **ПОГОДАЕВ Александр Валентинович – гл. геолог, a_pogodaev@ykgf.ru; ***ЧЕРНЕНКО Вадим Борисович – зам. начальника управления ОАО «Сахатранснефтегаз», cherne.vadim@yandex.ru.

и угленосных районов Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – С. 86–98.

11. Тимошина И.Д., Конторович А.Э., Ноговицин К.Е. Состав углеводородов-биомаркеров в породах лахан-

динской серии (рифей) на востоке Сибирской платформы // Успехи органической геохимии. – Новосибирск, 2010. – С. 333–337.

Поступила в редакцию 02.07.2015

553.981:622(571.56-15)

О возможности совместного освоения запасов газа из традиционных коллекторов и плотных пород на месторождениях Хапчагайского нефтегазоносного района

В.С. Ситников*, К.А. Павлова*, А.В. Погодаев**, В.Б. Черненко***

**Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск*

***ОАО «Якутскгеофизика», г. Якутск*

****ОАО «Сахатранснефтегаз», г. Якутск*

Рассмотрены общие сведения об использовании на практике работ на нефть и газ относительно нового понятия «трудноизвлекаемые ресурсы углеводородного сырья». На примере Хапчагайского нефтегазоносного района, приуроченного к одноименному сводовому поднятию первого порядка в восточной части Вилюйской синеклизы, приведены факты, которые однозначно указывают на наличие гидродинамической связи ранее выявленных газовых залежей в мезозойских и верхнепермских отложениях. Охарактеризованы аргументы, учитываемые в дискуссии о возможном наличии в разрезе верхней перми крупнейшей газовой залежи массивного типа, контролируемой Хапчагайским поднятием. Предложена условная модель возможного совместного освоения запасов газа в традиционных коллекторах и прогнозируемых ресурсов в более глубоких горизонтах чехла, сложенных плотными слабопроницаемыми породами. Даны рекомендации по широкому применению предлагаемого методического подхода в осадочных отложениях разного возраста и литологического состава, в том числе на месторождениях Вилюйской нефтегазоносной области в целом и за ее пределами.

Ключевые слова: газ, нефть, синеклиза, поднятие, запасы, ресурсы, методика, освоение, извлечение.

On the Possibility of Joint Development of Gas Reserves from Traditional Collectors and Solid Rocks at Khapchagaysky Petroleum District Deposits

V.S. Sitnikov*, K.A. Pavlova**, A.V. Pogodaev**, V.B. Chernenko***

**Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk*

***JSC «Yakutskgeofizika», Yakutsk*

****JSC «Sakhatransneftegaz», Yakutsk*

General information about using in works for oil and gas a relatively new concept of «hard-to-recover hydrocarbon resources» is considered. The facts showing the existence of the hydrodynamic connectivity of previously identified gas deposits in the Mesozoic and Upper Permian sediments for Khapchagaysky petroleum district dedicated to the eponymous arched uplift of the first order in the eastern part of Vilyui syncline, are presented. The arguments which can be taken into account in discussions about the possible existence of the largest gas deposit of a massive type in the section of the Upper Permian, controlled by Khapchagaysky

*СИТНИКОВ Вячеслав Стефанович – д.г.-м.н., зав. лаб., sitgeo@mail.ru; *ПАВЛОВА Капитолина Алексеевна – м.н.с., pavlova_kapitolina@mail.ru; **ПОГОДАЕВ Александр Валентинович – гл. геолог, a_pogodaev@ykgf.ru; ***ЧЕРНЕНКО Вадим Борисович – зам. начальника управления ОАО «Сахатранснефтегаз», cherne.vadim@yandex.ru.

uplift are described. A conditional model of a possible joint development of gas reserves in traditional collectors and of predictable resources in deeper horizons of the mantle with solid low permeable rocks are suggested. Recommendations for a wide application of the proposed methodological approach in the sediments of different age and lithology, including oil and gas fields of Vilyuisk region as a whole and beyond it.

Key words: gas, oil, syncline, uplift, reserves, resources, methods, development, extraction.

Примерно с конца 60-х годов прошлого столетия, наряду с исследованиями по прогнозу, поискам и разведке залежей нефти и газа, которые традиционно рассматривались как обычные невосполняемые источники углеводородного сырья, в мировой практике значительное внимание стали уделять так называемым «нетрадиционным» видам углеводородного сырья. Непосредственно в России в их число были включены крупные скопления битумов, залегающие на дневной поверхности или в верхней части разреза осадочного чехла; углеводородные газы (УВГ), содержащиеся в угольных пластах; УВГ, растворенные в пластовых водах, которые в значительной степени различаются по степени газонасыщенности; УВГ, рассеянные в плотных осадочных породах, которые по своим фильтрационно-емкостным свойствам не могут быть отнесены к категории традиционных коллекторов с их граничными значениями эффективной пористости и газопроницаемости [2].

В группу нетрадиционных источников углеводородов входят также сланцевые толщи, связанные с низкопроницаемыми и низкопоровыми коллекторами, причем не только с тонколистоватыми сланцеватыми аргиллитами типа баженовской и менелитовой серий, широко известных в Западно-Сибирском и Карпатском регионах. На современном этапе развития нефтегазовой геологии черносланцевые толщи вызывают пристальное внимание в связи с существенным ростом их промышленной значимости.

Буквально в последние годы в перечень научных и производственных терминов, используемых в нефтегазовой отрасли, введено новое понятие «трудноизвлекаемые запасы нефти и газа». В части нефтяных углеводородов к ним относятся, очевидно, многие ранее открытые залежи нефти, характеризующиеся высокими значениями плотности, вязкости, содержащие значительное количество парафина и (или) асфальтена, смол и др. Весьма сложная проблема связана также с раздельным освоением запасов нефти и газа и, в частности, с опережающим извлечением нефти, сконцентрированной в недрах в виде нефтяных оторочек крупных нефтегазоконденсатных месторождений, в углеводородном потенциале которых преобладающую роль играют запасы газа [2].

В отношении углеводородных газов в настоящее время нет единого мнения, что понимать под терминами «нетрадиционные источники газа» и «трудноизвлекаемые запасы газа». Существующую категорию псевдонетрадиционных газовых залежей, где газ находится в свободной форме, в том числе в рассеянном состоянии, в низкопроницаемых или глубокозалегающих субколлекторах корректнее называть «трудноизвлекаемые ресурсы газа» [5].

В настоящей статье на примере Хапчагайского нефтегазоносного района и многих изученных здесь газоконденсатных месторождений рассматриваются вопросы гидродинамической взаимосвязи УВГ, находящихся в залежах в свободном состоянии, с одной стороны, и УВГ, рассредоточенных в плотных непроницаемых или слабопроницаемых породах, с другой.

Хапчагайский газонасыщенный район приурочен к одноименному крупному мегавалу, осложняющему центральную приосевую часть Вилуйской синеклизы (рис. 1). Мегавал расположен в нижнем течении р. Вилуй и протягивается в

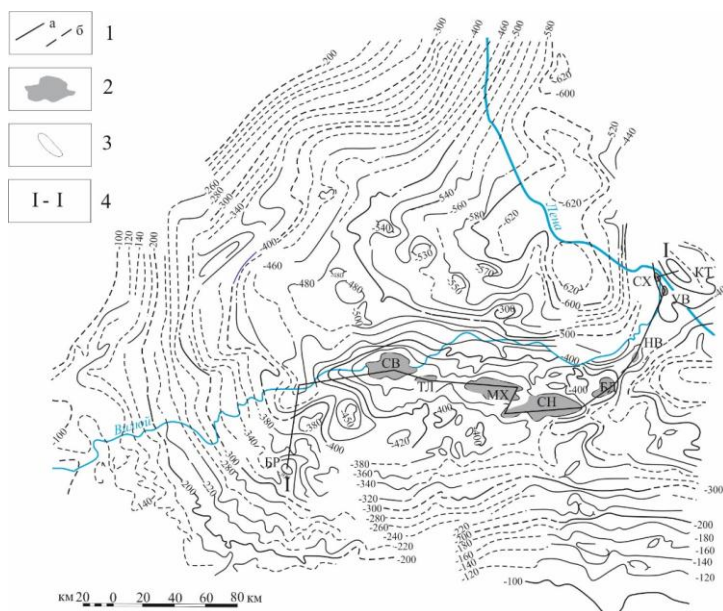


Рис. 1. Расположение Хапчагайского нефтегазоносного района на востоке Вилуйской синеклизы: 1 – изогипсы сейсмического отражающего горизонта ТП (триас–пермь): а – достоверные, б – условные; 2 – газоконденсатные месторождения: СВ – Средневилуйское, ТЛ – Толонское, СН – Соболюх-Неджелиинское, БД – Бадаранское; НВ – Нижневилуйское, УВ – Усть-Вилуйское, CX – Собо-Хаинское; 3 – площади глубокого бурения: БР – Бырыканская, КТ – Китчанская; 4 – линия геолого-геофизического профиля I-I

субширотном направлении более чем на 200 км, ширина его 40–50 км. В своде поднятия резко сокращена мощность нижнемеловых пород, амплитуда его по подстилающим отложениям достигает 1,0–1,2 км. Поднятие осложнено рядом крупных локальных структур, контролирующих выявленные здесь месторождения газа (Средневилюйское, Толонское, Матахское, Соболюх-Неджелиинское, Бадаранское) (рис. 2).

Ранее проведенными научными исследованиями (В.С. Ситников, В.Б. Спектор, 1978) было установлено, что значительная роль в заложении, геологическом развитии и современном размещении Хапчагайского поднятия и осложняющих его структур сыграли процессы формирования субпараллельной зоны разломов, выделенной по геолого-геофизическим и геоморфологическим данным с учетом результатов дешифрирования космфотоснимков в составе Вилюйско-Алданской системы дислокаций. Последний источник использованной информации однозначно указывает на наличие здесь современной активности недр [3].

К настоящему времени в Хапчагайском газоносном районе глубоким бурением изучена верхняя часть осадочного чехла (до 4,0–4,5 км), представленная терригенными образованиями мезозоя и верхней перми. В пределах этого разреза выделяется ряд продуктивных комплексов.

Следует отметить, что в начале 80-х годов в сводовой части Средневилюйской антиклинальной структуры, контролирующей одноименное газоконденсатное месторождение, пробурена скв. №27 глубиной 6519 м. Это самая глубокая вертикальная скважина в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. При отсутствии однозначно интерпретируемых палеонтологических данных стратификация нижней части вскрытого разреза (примерно 3 км) проведена сугубо условно. Согласно этим данным, скважиной вскрыт полный разрез верхней и нижней перми и частично верхи каменноугольной системы. Геолого-геофизические данные о характере строения нижней части разреза этой скважины свидетельствуют о распространении здесь преимущественно плотных песчаных пород, которые по литологическим особенностям практически не отличаются от ранее изученных многими поисковыми и разведочными скважинами верхнепермских отложений.

Верхнепермский продуктивный комплекс сложен преимущественно песчаными угленосными отложениями и экранируется глинистой толщей неджелиинской свиты нижнего триаса. Внутри комплекса и в перекрывающей покрыв-

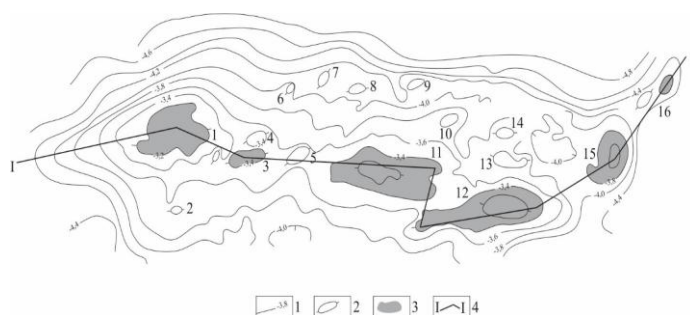


Рис. 2. Структурная карта Хапчагайского нефтегазоносного района (по материалам интерпретации сейсморазведочных данных). Масштаб 1:1 500 000: 1 – изогипсы отражающего сейсмического горизонта ТП (триас–пермь); 2 – локальные антиклинальные структуры; 3 – газоконденсатные месторождения; 4 – линия профильного геолого-геофизического разреза на территории Хапчагайского нефтегазоносного района.

Цифрами на карте обозначены структуры: 1 – Средневилюйская; 2 – Северо-Тымтайдакская; 3 – Толонская; 4 – Верхнетолонская; 5 – Северо-Кумахская; 6 – Северо-Толонская; 7 – Лонголохская; 8 – Джикиндинская; 9 – Безымянная; 10 – Восточно-Баппагайская; 11 – Матахская; 12 – Соболюх-Неджелиинская; 13 – Люксюгунская; 14 – Среднелюксюгунская; 15 – Бадаранская; 16 – Нижневилюйская

ке выявлен ряд продуктивных горизонтов (T_1-IV , ПТ, P_2-I , P_2-II , P_3-III), характеризующихся аномально высокими пластовыми давлениями, на 80–100 кгс/см² превышающими гидростатические. Наблюдается резкая изменчивость коллекторских свойств продуктивных отложений по площади и разрезу.

Нижнетриасовый продуктивный комплекс мощностью до 600 м экранируется мономской глинистой покрывкой. Непосредственно под ней и внутри неё (горизонты T_1-III , T_1-II и T_1-I) сосредоточены основные запасы газа крупнейшего Средневилюйского месторождения. В центральной части Хапчагайского района мономская покрывка опесчанивается.

Среднетриасовый-нижнеюрский продуктивный комплекс экранируется тоарской глинистой пачкой, являющейся наиболее выдержанной покрывкой в пределах описываемого района. В этом комплексе на ряде месторождений установлена промышленная газоносность двух горизонтов (J_1-I , J_1-II).

Средневерхнеюрский продуктивный комплекс контролируется регионально выдержанной глинисто-песчаной толщей марыкчанской свиты (верхняя юра). Из отложений комплекса получены промышленные притоки газа на Средневилюйском месторождении (горизонты J_3-I , J_3-II).

Верхнеюрский-нижнемеловой продуктивный комплекс сложен исключительно континентальными угленосными отложениями. Достаточно

мощные выдержанные покрывки в разрезе отсутствуют. Небольшая газовая залежь, приуроченная к нижнемеловым отложениям комплекса, установлена на Бадаранском месторождении (горизонт К).

Кроме уже известных отложений верхней перми, в пределах Хапчагайского поднятия на основании результатов бурения скв. №27 и региональных литолого-палеогеографических построений предполагается существование нижнепермского возможно перспективного комплекса. С ним связаны основные перспективы более глубоких горизонтов Хапчагайского поднятия, для изучения которых потребуются бурение скважин глубиной 7 км и более.

Структуры, контролирующие газовые месторождения, осложняют осевую зону мегавала. Это почти симметричные брахиантиклинальные площади от 200 до 400 км², размерами 20–30х10–20 км и амплитудой, в основном, от 200 до 500 м. В присводовой части Хапчагайского поднятия и на погружениях его склонов, по данным сейсморазведки, выделяется ряд структур меньших размеров. Они имеют площадь 20–40 км² и отличаются от структур осевой зоны более вытянутой формой и меньшей амплитудой, не превышающей 70–100 м [1].

Установленные в Вилуйской НГО газоконденсатные залежи на многих месторождениях в разведочных и эксплуатационных скважинах сопровождаются обильными проявлениями нефти, вплоть до притоков промышленного и полупромышленного значения. Судя по геохимическим данным, эти нефти связаны, в основном, с другими (некембрийскими) очагами генерации, среди которых основную роль играет углеводородный потенциал пермских отложений. Определенными генерационными способностями обладают также нижнетриасовые и нижнеюрская толщи существенно глинистого состава (неджелинская, мономская, сунтарская).

В течение весьма продолжительной истории геологического развития рассматриваемой территории с неоднократными всплесками активности тектонических и нефтегазогеологических процессов, наряду с генерацией вновь образованных УВ, вполне возможны межрезервуарные перетоки пластовых флюидов вверх по разрезу в более молодые стратиграфические подразделения, в частности, из кембрия в пермь и далее в мезозойские толщи [4]. Наиболее активно эти миграционные перемещения происходили, очевидно, в зоне глубинных разломов, контролирующих расположение и особенности строения крупных поднятий (Хапчагайское, Логлорское) и осложняющих их структур более высокого порядка. Этот тезис подтверждается результатами геохимических исследований пластовых флюи-

дов, указывающими на существенное обеднение мигрирующей углеводородной смеси тяжелыми УВ и упрощение ее состава вверх по разрезу вплоть до полного преобладания метана.

Характерно, что по мере незначительного удаления от Хапчагайской зоны разломов к северу в сторону Линденской впадины резко сокращается газонасыщенность пластовых вод в разрезе мезозоя. Кроме того, в районе г. Вилуйска в разрезе ранее пробуренной опорной скважины на глубине примерно 3 км в отложениях средней юры отмечается уникально низкая общая минерализация пластовых вод, которая не превышает здесь первых граммов на литр и сопоставима с таковой в верхней части разреза Вилуйской синеклизы. Приведенные данные однозначно указывают на наличие активных процессов вертикальной миграции в отмеченной выше зоне разломов и, вместе с тем, на весьма слабую практически пассивную газогидродинамическую обстановку в других районах синеклизы, удаленных от системы разломов и зон трещиноватости, достаточно активных на современном этапе.

Приведенные данные по нефтегазогеологической активности недр в районе Хапчагайского поднятия косвенно подтверждаются результатами анализа данных по разработке нижнеюрской газовой залежи Мастахского месторождения. В 70-е годы и начале 80-х годов эксплуатация скважин здесь велась при больших депрессиях (1,4–6,6 МПа) и максимально возможных дебитах, что вероятно и обусловило неравномерное стягивание газоводяного контакта от территории залежи к ее центру. В свою очередь, нарушения в режиме отбора газа в различных скважинах привели к прорыву воды, техногенному образованию пластовых языков и воронок и, соответственно, к досрочному обводнению газовой залежи. При этом пластовое давление в залежи упало почти на 4,0 МПа [6].

С 1986 г., когда строительство газопровода было продолжено до п. Кысыл-Сыр и функции главного поставщика газа в г. Якутск и прилегающие населенные пункты были переориентированы на нижнетриасовые газовые залежи Средневилуйского ГКМ, в дальнейшем вплоть до настоящего времени нижнеюрская газовая залежь Мастахского месторождения уже почти не разрабатывалась.

Проведенные на современном этапе замеры пластового давления в этой залежи показали, что за прошедший период длительностью около 30 лет произошла значительная релаксация газонасыщенной части залежи и пластовое давление в ней восстановилось почти наполовину [6]. На наш взгляд, указанные процессы обусловле-

ны в основном достаточно интенсивными потоками газа из нижних горизонтов разреза естественным путем по многочисленным трещинам. Наличие последних в верхней части разреза пермских отложений по керну установили и детально изучили ранее [1].

С учетом приведенных данных об особенностях строения Хапчагайского мегавала и значительной роли разломно-трещинной тектоники в процессах формирования имеющихся здесь скоплений газа, по нашему мнению, целесообразно возвратиться на новом уровне знаний к представлениям прошлых лет о своеобразии и масштабах газоносности верхнепермских отложений в рамках рассматриваемого поднятия в целом. По мнению академика Н.В. Черского (1970), основанному на фактах повсеместной продуктивности верхнепермских отложений, в том числе на всех ранее открытых месторождениях с газовыми залежами преимущественно в мезозойских отложениях, а также в неструктурных условиях на обширных полях, разделяющих вышеуказанные газоносные антиклинальные структуры, все газовые скопления в верхнепермских отложениях следует, очевидно, рассматривать как единую гигантскую газовую залежь массивного типа. В структурном отношении она контролируется Хапчагайским поднятием в целом, как единой суперловушкой, и заполнена газом практически до замка. Верхняя указанной залежи сложены традиционными коллекторами выделенных ранее продуктивных горизонтов (Т₁-IV, ПТ, Р₂-I, Р₂-II, Р₃-III и др.). Преобладающая нижняя часть залежи приурочена к плотным низкопроницаемым породам верхней перми, которые могут рассматриваться как субколлекторы нетрадиционного типа (рис. 3).

Спорные вопросы, дискутируемые в течение многих лет о возможном наличии в массиве плотных верхнепермских пород зашумленных водоносных линз, о причинах присутствия подошвенных вод, подстилающих газовую залежь в традиционных коллекторах горизонта P₂-I на Средневилюйском ГКМ, а также о геологической природе АВПД в отложениях верхней перми и многих альтернативных вариантах ее объяснения, на наш взгляд, в целом не противоречат изложенной выше концепции. Это отдельные геологические проблемы, требующие в дальнейшем целенаправленного длительного изучения.

С учетом запасов газа, разведанных на Хапчагайском поднятии на всех выявленных здесь месторождениях в мезозойских и верхнепермских коллекторах, и огромных ресурсов, связанных с УВГ, рассеян-

ными в нижележащих плотных низкопроницаемых породах, суммарный газовый потенциал Хапчагайского района явно превышает тот объем газа, который требовалось подготовить в соответствии с постановлением Правительства СССР в начале 1972 г. о развороте геологоразведочных работ на газ на территории Якутской АССР к концу 1975 г. (1 трлн м³). Справочно можно отметить, что указанный рубеж по республике в целом был достигнут лишь в 1993 г., однако, в последнем случае речь идет исключительно о коллекторах традиционного типа.

По итогам выполненной в НИИПГИТ ОАО «Газпром» – ВНИИГАЗ по России в целом оценке перспектив введения в промышленное освоение ресурсов газа, связанных с низкопроницаемыми породами, возможные сроки по Восточной Сибири и Дальнему Востоку отнесены к 2030 г. [5]. С учетом приведенных выше данных по Хапчагайскому нефтегазоносному району и, в частности, фактов о наличии гидродинамической связи выявленных мезозойских и верхнепермских газовых залежей с более глубокими горизонтами осадочного чехла процесс освоения УВГ в плотных породах опосредованно может быть начат здесь уже в ближайшие годы.

Развиваемые в настоящей статье новые представления изложены применительно к Вилюйской НГО. На наш взгляд, они вполне могут быть распространены и на другие территории Сибирской платформы с установленной промышленной нефтегазоносностью.

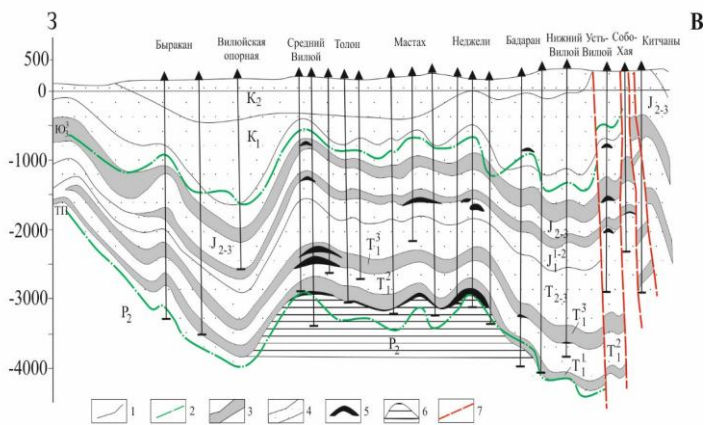


Рис. 3. Субширотный профильный геолого-геофизический разрез через Хапчагайский нефтегазоносный район. Масштаб горизонтальный 1:3 000 000, вертикальный 1: 500 000: 1 – геологические границы; 2 – отражающие горизонты; 3 – региональные существенно глинистые экраны (сверху вниз: марыкчанская свита верхней юры, сунтарская свита нижней юры, мономская и неджелинская свиты нижнего триаса); 4 – толщи преимущественно песчаного состава; 5 – газовые и газоконденсатные залежи; 6 – прогнозируемая массивная залежь в отложениях верхней перми; 7 – разрывные тектонические нарушения

Литература

1. Головачев В.С. Геологическое строение и нефтегазоносность месторождений Хапчагайского района / В.С. Головачев, В.Ф. Кеввай, Я.И. Куприянов, Д.П. Сидоров // Поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений в Якутской АССР. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. – С. 102–114.
2. Прищепа О.М. Понятийная база и терминология углеводородов сланцевых толщ и низкопроницаемых коллекторов / О.М. Прищепа, О.Ю. Аверьянова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – №6.
3. Ситников В.С., Спектор В.Б. Вилуйско-Алданская система дислокаций // Геофизические исследования в Якутии. – Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1978.
4. Ситников В.С. Перспективы нефтеносности южной части Вилуйской синеклизы / В.С. Ситников, И.А. Кушмар, О.М. Прищепа // Разведка и охрана недр. – 2014. – №7.
5. Скоробогатов В.А. Потенциальные ресурсы нетрадиционного газа недр России (суша и шельф) и перспективы их промышленного освоения до 2050 г. / В.А. Скоробогатов, Е.П. Перлова // Геология нефти и газа. – 2014. – №5.
6. Черненко В.Б., Сивцев А.И. К проблеме релаксации юрской залежи Мастахского ГКМ // Наука и образование. – 2015. – №1. – С. 16–21.

Поступила в редакцию 05.10.2015

УДК 552.321(571.56)

Фанерозойские базиты восточной части Сибирской платформы

М.Д. Томшин, А.Г. Копылова

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

В восточной части Сибирской платформы фанерозойский базитовый магматизм проявился в разных тектонических структурах. В среднепалеозойское и нижнетриасовое время он связан с процессами рифтогенеза, а в позднепалеозойское-раннемезозойское – с заложением и развитием трапповых синеклиз. Различие геодинамического режима магмообразования зафиксировано в геохимическом разнообразии пород. Для пермотриасовых траппов свойственно невысокое содержание несовместимых элементов, незначительная сумма REE (60–70 ppm), умеренная степень их фракционирования $(La/Yb)_n=2,0-2,8$, наличие Ta-Nb минимума. По содержанию несовместимых элементов и положению их на графиках парных отношений элементов траппы образуют практически единую совокупность с составом E-MORB, что свидетельствует о ведущей роли источника такого типа в их образовании. Среднепалеозойский рифтогенез сопровождался формированием поясов даек и излиянием базальтов. Для рифтогенных девонских базитов характерно высокое содержание несовместимых элементов, значительная дифференцированность REE $(La/Yb)_n=4,3-5,4$ и положительная Ta-Nb аномалия. По геохимическим параметрам долериты даечного комплекса близки базальтам OIB, а эффузивы на спайдер-диаграммах и графиках парных отношений элементов располагаются между значениями для E-MORB и OIB. Отличительной геохимической чертой трахидолеритов является максимально высокое содержание в них несовместимых элементов. Характер распределения REE в трахидолеритах отличается значительным фракционированием $(La/Yb)_n=23$. На корреляционных графиках несовместимых элементов составы фанерозойских базитов укладываются в общий тренд от области составов E-MORB через OIB в области более высоких содержаний в трахидолеритах.

Ключевые слова: восточная часть Сибирской платформы, фанерозойские базиты, микроэлементный состав, магматические источники.

Phanerozoic Basites of the Eastern Part of the Siberian Platform

M.D. Tomshin, A.G. Kopylova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

In the eastern part of the Siberian platform, Phanerozoic magmatism manifested itself in various tectonic structures. It was related, in Middle Paleozoic and Lower Triassic times, to rifting processes, and in Late

Литература

1. Головачев В.С. Геологическое строение и нефтегазоносность месторождений Хапчагайского района / В.С. Головачев, В.Ф. Кеввай, Я.И. Куприянов, Д.П. Сидоров // Поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений в Якутской АССР. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. – С. 102–114.
2. Прищепа О.М. Понятийная база и терминология углеводородов сланцевых толщ и низкопроницаемых коллекторов / О.М. Прищепа, О.Ю. Аверьянова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – №6.
3. Ситников В.С., Спектор В.Б. Вилуйско-Алданская система дислокаций // Геофизические исследования в Якутии. – Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1978.
4. Ситников В.С. Перспективы нефтеносности южной части Вилуйской синеклизы / В.С. Ситников, И.А. Кушмар, О.М. Прищепа // Разведка и охрана недр. – 2014. – №7.
5. Скоробогатов В.А. Потенциальные ресурсы нетрадиционного газа недр России (суша и шельф) и перспективы их промышленного освоения до 2050 г. / В.А. Скоробогатов, Е.П. Перлова // Геология нефти и газа. – 2014. – №5.
6. Черненко В.Б., Сивцев А.И. К проблеме релаксации юрской залежи Мастахского ГКМ // Наука и образование. – 2015. – №1. – С. 16–21.

Поступила в редакцию 05.10.2015

УДК 552.321(571.56)

Фанерозойские базиты восточной части Сибирской платформы

М.Д. Томшин, А.Г. Копылова

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

В восточной части Сибирской платформы фанерозойский базитовый магматизм проявился в разных тектонических структурах. В среднепалеозойское и нижнетриасовое время он связан с процессами рифтогенеза, а в позднепалеозойское-раннемезозойское – с заложением и развитием трапповых синеклиз. Различие геодинамического режима магмообразования зафиксировано в геохимическом разнообразии пород. Для пермотриасовых траппов свойственно невысокое содержание несовместимых элементов, незначительная сумма REE (60–70 ppm), умеренная степень их фракционирования $(La/Yb)_n=2,0-2,8$, наличие Ta-Nb минимума. По содержанию несовместимых элементов и положению их на графиках парных отношений элементов траппы образуют практически единую совокупность с составом E-MORB, что свидетельствует о ведущей роли источника такого типа в их образовании. Среднепалеозойский рифтогенез сопровождался формированием поясов даек и излиянием базальтов. Для рифтогенных девонских базитов характерно высокое содержание несовместимых элементов, значительная дифференцированность REE $(La/Yb)_n=4,3-5,4$ и положительная Ta-Nb аномалия. По геохимическим параметрам долериты даечного комплекса близки базальтам OIB, а эффузивы на спайдер-диаграммах и графиках парных отношений элементов располагаются между значениями для E-MORB и OIB. Отличительной геохимической чертой трахидолеритов является максимально высокое содержание в них несовместимых элементов. Характер распределения REE в трахидолеритах отличается значительным фракционированием $(La/Yb)_n=23$. На корреляционных графиках несовместимых элементов составы фанерозойских базитов укладываются в общий тренд от области составов E-MORB через OIB в области более высоких содержаний в трахидолеритах.

Ключевые слова: восточная часть Сибирской платформы, фанерозойские базиты, микроэлементный состав, магматические источники.

Phanerozoic Basites of the Eastern Part of the Siberian Platform

M.D. Tomshin, A.G. Kopylova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

In the eastern part of the Siberian platform, Phanerozoic magmatism manifested itself in various tectonic structures. It was related, in Middle Paleozoic and Lower Triassic times, to rifting processes, and in Late

Paleozoic – Early Mesozoic times – to the initiation and development of traps. Varying geodynamic regime of magma generation resulted in a geochemical variety of the rocks. The Permo-Triassic traps are characterized by a low content of incompatible elements, insignificant REE totals (60–70 ppm), a moderate degree of fractionation $(La/Yb)_n=2.0–2.8$ and the presence of a Ta-Nb minimum. By the amount of incompatible elements and their position on the correlation diagrams the traps are similar to E-MORB, which suggests that source rocks of this composition played a leading role in their formation. Middle Paleozoic rifting was accompanied by the formation of dike swarms and by eruptions of basalts. Characteristics of the rift-related Devonian basites are a high content of incompatible elements, significant REE differentiation $(La/Yb)_n=4.3–5.4$ and a positive Ta-Nb anomaly. Geochemically, dolerites of the dike swarm are close to OIB, and effusive rocks on spider and correlation diagrams of elements are plotted between the values for E-MORB and OIB. A distinctive geochemical feature of trachydolerites is the highest content of incompatible elements, the character of REE distribution is distinguished by significant fractionation $(La/Yb)_n=23$. On the correlation diagrams of incompatible elements, compositions of Phanerozoic basites exhibit a general trend from the E-MORB field through OIB to the field of higher contents in trachydolerites.

Key words: eastern part of the Siberian platform, Phanerozoic basites, trace element content, magmatic sources.

Введение

В течение фанерозойского времени базитовый магматизм в пределах Сибирской платформы проявлялся неоднократно начиная с раннего кембрия и до позднего триаса. Цель данного сообщения – расширить представление о вещественном составе разновозрастных базитов восточной части платформы в дополнение к ранее опубликованным сведениям. Раннекембрийские базиты пользуются ограниченным распространением и в данной статье не рассматриваются. В основу работы положены результаты химических и геохимических характеристик базитов среднепалеозойского, пермотриасового и позднепермского возрастов. Определение породообразующих элементов проводилось классическим методом мокрой химии в лаборатории физико-химических методов анализа (ИГАБМ СО РАН), редкие элементы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Elan 6100 DRC в стандартном режиме (аналитик Д.З. Журавлев, ИМГРЭ).

Петрохимические и геохимические характеристики фанерозойских базитов

Структурно-геологический план среднепалеозойского времени обусловлен широким проявлением процессов рифтообразования [1, 2]. Наиболее крупными рифтогенными структурами являются Вилюйское и Оленекское ответвления Предверхоанского палеорифта. Становление палеорифтов сопровождалось формированием протяженных дайковых поясов на бортах рифтов и излиянием базальтов в пределах рифтовых долин. На северо-западном борту Вилюйского палеорифта расположен Вилюйско-Мархинский дайковый пояс, состоящий из роев даек, хонолитов и силлов. На юго-за-

падном борту Оленекского палеорифта рой даек объединены в Молодинский дайковый пояс. Петрографическая характеристика среднепалеозойских базитов приведена в работах [3–5]. Среди них наиболее распространены долериты и габбро-долериты с офитовой, призматически-офитовой и такситоофитовой структурой. Основные породообразующие минералы – плагиоклаз, клинопироксен, оливин и титаномagnetит, акцессорные – роговая обманка, биотит, калиевый полевой шпат. Базиты интрузивной фации принадлежат к производным субщелочного и нормального толеит-базальтового состава магм (рис. 1). Большинство интрузивов образованы из расплавов, в значительной степени дифференцированных ($Mg\# = 36–50$) и насыщенных кремнекислотой, что фиксируется в наличии свободного кварца.

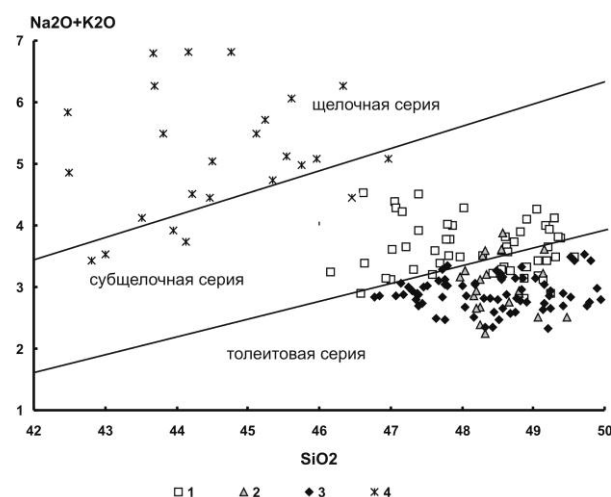


Рис. 1. Диаграмма $SiO_2+(Na_2O+K_2O)$ для фанерозойских базитов восточной части Сибирской платформы: 1 – среднепалеозойские базиты; 2 – среднепалеозойские базальты аптаинской свиты; 3 – пермотриасовые траппы; 4 – нижнетриасовые трахидолериты

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БАЗИТЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Характерной особенностью долеритов являются довольно высокие содержания TiO_2 , K_2O и P_2O_5 (таблица).

В заключительную стадию среднепалеозойского рифтогенеза формировались эффузивы. В Ыгыттинской впадине Виллюйского палеорифта они участвуют в сложении аппаинской свиты, представленной порфировыми гиаобазальтами с массивной, миндалекаменной или пузырчатой текстурой и офитовой или интерсертальной структурой основной массы. В порфировом сложении пород участвуют плагиоклаз и оливин, замещенный боулингом. Излияние лавы происходило в морской бассейн, что способствовало образованию палагонитового агрегата, присутствие которого в базальтах обусловило повышенное содержание магния ($Mg\# = 51-56$) и кальция ($CaO > 10\%$), а также более высокую степень окисленности железа. В базальтах по сравнению с интрузивными магматитами установлены пониженные содержания $Fe_{общ}$, TiO_2 , K_2O , P_2O_5 , Zn , Cu , максимальные значения Cr и более высокие Ni (таблица, рис.2).

Особенности поведения несовместимых элементов в ба-

Составы представительных проб базитов восточной части Сибирской платформы

	Среднепалеозойские базиты						Базальты аппаинской свиты			
	129Д-4	38/43-30	550-5	534-4	ол-142-4	151-3	144/10-1	144/10-5a	155/10-1	155/10-5
SiO_2	48,56	46,15	48,06	48,84	47,41	47,21	48,4	48,33	48,14	48,33
TiO_2	3,84	3,67	2,75	3,11	2,89	2,61	2,1	1,91	2,34	1,91
Al_2O_3	12,69	11,77	13,84	13,05	15,01	14,78	13,39	13,45	14,25	13,45
Fe_2O_3	5,39	3,12	3,12	3,38	5,94	5,20	4,67	5,02	4,48	5,02
FeO	9,27	13,05	11,83	12,44	6,37	7,10	7,91	6,99	7,48	6,99
MnO	0,19	0,19	0,21	0,25	0,15	0,16	0,15	0,14	0,15	0,14
MgO	4,91	6,89	5,75	4,97	5,47	6,63	7,71	8,08	6,71	8,08
CaO	9,66	7,12	10,8	9,05	8,88	9,40	10,5	10,63	11,47	10,63
Na_2O	2,14	2,12	2,11	2,13	3,74	3,26	1,7	1,7	1,95	1,7
K_2O	1,15	1,56	0,56	1,15	1,58	1,43	0,72	0,65	0,53	0,65
P_2O_5	0,58	0,34	0,26	0,32	0,53	0,41	0,24	0,24	0,23	0,24
H_2O^+	0,89	3,7	1,31	1,66	1,96	1,62	2,03	2,09	1,82	2,09
Сумма	100,2	99,68	100,6	100,3	99,93	99,81	99,52	99,23	99,55	99,23
$Mg\#$	42	43	41	36	45	50	53	56	51	56
Cs							0,13	0,19	0,11	0,59
Rb	31,5	29,49	12,59	28,85	23,5	24,1	15,3	15,1	11,8	12,3
Ba	259	210	171	304	714	938	175	162	150	160
Th	3,75	2,55	2,02	3,13	0,83	0,77	1,68	1,50	1,56	1,65
U	1,07	0,74	0,51	0,75	0,60	0,55	0,50	0,44	0,53	0,65
Nb	40,0	35,4	12,9	19,6	27,4	24,02	16,9	15,9	18,6	19,1
Ta	2,56	3,7	1,09	1,65	1,76	1,49	1,11	1,00	1,24	1,31
Sr	366	425	308	394	515	574	269	289	313	345
Zr	370	231	159	243	186	176	154	144	158	165
Hf	7,94	5,99	3,65	5,44	4,27	4,20	3,82	3,49	3,81	4,12
Y	41,3	31,26	33	41	30,13	27,62	23,9	23,7	26,6	24,9
Pb	5,15	3,02	1,81	3,00	4,34	3,85				
La	36,7	24,6	18,7	25,4	29,7	25,36	15,9	15,3	15,9	16,8
Ce	83,7	56,7	43,8	56,4	64,5	54,95	37,4	35,4	37,6	39,2
Pr	10,6	7,46	5,43	7,09	9,26	7,89	4,95	4,75	5,06	5,21
Nd	45,2	33,1	26,1	34,4	40,8	34,43	21,8	20,8	22,4	22,8
Sm	9,92	7,7	6,37	8,11	8,44	7,10	5,26	4,88	5,48	5,65
Eu	3,02	2,19	2,20	2,63	2,58	2,26	1,65	1,50	1,68	1,82
Gd	9,67	7,49	6,56	7,51	7,24	6,15	5,18	5,01	5,65	5,79
Tb	1,46	1,19	0,98	1,14	1,30	1,15	0,805	0,764	0,882	0,905
Dy	8,44	6,72	5,49	6,50	5,78	5,35	4,89	4,69	5,23	5,38
Ho	1,68	1,34	1,10	1,34	1,12	0,97	0,998	0,955	1,07	1,08
Er	4,37	3,33	3,05	3,72	2,77	2,33	2,71	2,49	2,83	2,84
Tm	0,61	0,47	0,46	0,57	0,45	0,39	0,39	0,37	0,39	0,42
Yb	3,68	2,97	2,99	3,59	2,64	2,09	2,42	2,20	2,38	2,48
Lu	0,54	0,41	0,43	0,49	0,37	0,27	0,36	0,33	0,36	0,37
Sc	35,3	32	45	37	41	43	38,0	38,6	35,6	36,6
V	387	424	352	346	305	330	309	305	301	313
Cr	181	110	130	54	113	124	210	220	210	175
Co	44,2	57	53	54	48	50	52	48	47	42
Ni	68	144	88	89	71	82	123	139	143	90,2
Cu	219	129	300	295	67	71	226	73,1	164	96,0
Zn	134	134	133	187	176	127	86	50	77	71
ΣREE	219	156	124	159	177	151	105	99	107	111
(La/Yb) _n	7,15	5,94	4,49	5,07	8,09	8,70	4,7	5,0	4,8	4,9
Eu/Eu*	0,93	0,87	1,03	1,01	0,88	1,02	0,96	0,92	0,92	0,96
Nb/Nb*	1,23	1,62	0,76	0,80	2,00	1,97	1,18	1,20	1,31	1,35
(Tb/Yb) _n	1,81	1,83	1,50	1,78	2,25	2,50	1,52	1,59	1,69	1,67

зитах девона показаны на спайдер-диаграммах (рис. 3). Долериты даечного комплекса относительно базальтов обогащены всеми несовместимыми элементами, особенно крупноионными литофилами – Rb, Ba, Sr, Pb, содержание которых во многом определяется флюидной фазой. Суммарное содержание REE в долеритах (139–177 ppm), характер их распределения REE отличаются заметным фракционированием $(La/Yb)_n = 4,5–8,7$. В эффузивах ΣREE ниже (99–111 ppm), отношение $(La/Yb)_n = 4,7–5,0$. Тренды девонских рифтогенных базитов на мультиэлементных диаграммах выделяются довольно высокими содержаниями практически всех несовместимых элементов. Для долеритов даечного комплекса они близки базальтам OIB, что, скорее всего, свидетельствует об участии компонента такого типа в формировании их расплавов. Содержания микроэлементов в базальтах аппаинской свиты на спайдер-диаграммах и графиках парных отношений элементов располагаются между значениями для E-MORB и OIB (рис. 2–3). Общим показателем для спектров среднепалеозойских пород разных фаций является отсутствие Eu и Ta-Nb аномалий.

В пермотриасовое время тектономагматическая активизация совпала с периодом расчленения Сибирской платформы на крупные геоблоки, составляющие основу её современного структурного плана. Процесс сопровождался контрастными вертикальными перемещениями геоблоков, активизацией древних и заложением более молодых магмовыводящих зон, формированием трапповых синеклиз. По периферии синеклиз возникали обширные (до десятков км в поперечнике) глубоко проникающие зоны разломов, являющиеся основными магмовыводящими элементами. По ним внедрялся колоссальный объем магмы основного состава, формировавший породы трапповой формации, включающей в себя интрузии,

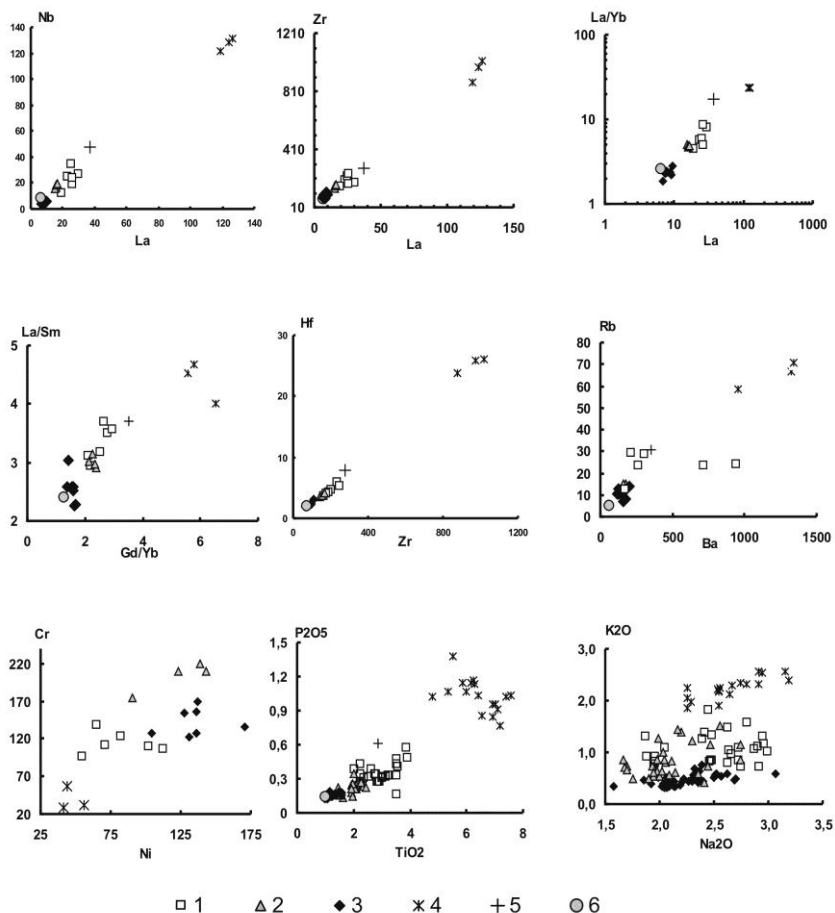


Рис. 2. Корреляционные отношения микроэлементов и породообразующих $TiO_2-P_2O_5$ и Na_2O-K_2O в фанерозойских базитах восточной части Сибирской платформы: 1 – среднепалеозойские базиты; 2 – среднепалеозойские базальты аппаинской свиты; 3 – пермотриасовые траппы; 4 – нижнетриасовые трахидолериты; 5 – базальты океанических островов (OIB); 6 – базальты срединно-океанических хребтов (E-MORB)

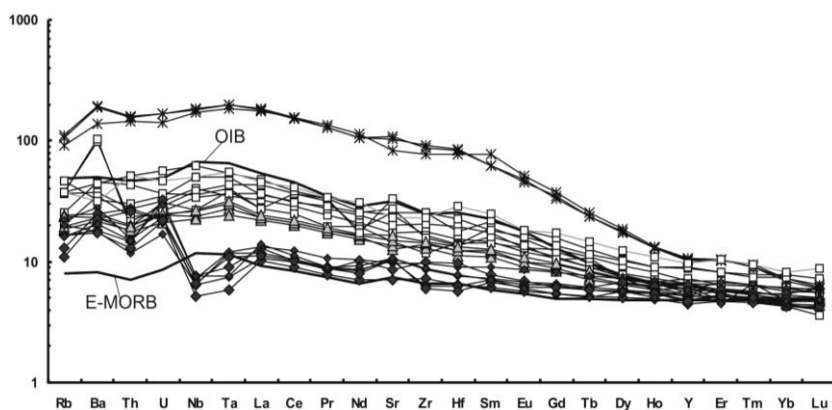


Рис. 3. Распределение несовместимых элементов в фанерозойских базитах, нормированных к составу примитивной мантии [9]. Усл. обозначения см. на рис. 1

лавы и туфы. В восточной части платформы эффузивная составляющая была практически эродирована, а интрузивная представлена разнотифференцированными многоярусными те-

лами траппов, простирающимися на десятки и сотни километров. Основной объем производных толеит-базальтовых магм сосредоточен в пределах Тунгусской синеклизы, менее распространены они на Оленекском поднятии и по бортам Анабарской антеклизы. Интрузии сложены в основном офитовыми и пойкилоофитовыми долеритами и габбро-долеритами. В них практически отсутствуют кварц, биотит, роговая обманка, характерные для среднепалеозойских базитов.

Химический и микроэлементный состав долеритов достаточно выдержан и характеризуется умеренным содержанием магния (6–8%), щелочей (их сумма не превышает 2,5–3%), при доминирующей роли натрия. По химическому составу траппы уверенно отличаются от девонских базитов более низкими содержаниями Ti, P, K (рис. 2). Средние содержания когерентных элементов (ppm): Ni–131, Co–49, Cr–175, V–294, Sc–39, Cu–168, Zn–108 близки к их значениям в долеритах, образованных нормальным толеит-базальтовым расплавом [6]. Распределение REE отличается невысоким суммарным содержанием (52–72 ppm), умеренным фракционированием $(La/Yb)_n=1,9–2,8$, отсутствием европиевой аномалии ($Eu/Eu^*=0,93–1,02$). Наличие Ta-Nb минимума на спайдер-диаграмме (рис. 3) типично для траппового магматизма в целом и является основным отличием спектров траппов от других производных базальтового расплава. По геохимическим параметрам траппы близки к базальтам типа E-MORB, отличаясь от последних наличием Ta-Nb аномалии, а также повышенными концентрациями Ba, Rb, Th и U. На корреляционных графиках несовместимых элементов и P_2O_5 – TiO_2 они образуют практически единую совокупность с составом E-MORB, что свидетельствует о ведущей роли источника такого типа в их образовании.

Завершают цикл фанерозойского магматизма на Сибирской платформе интрузивы клинопироксеновых трахидолеритов нижнетриасового возраста. Образованы они щелочной оливин-базальтовой серией расплавов и приурочены к Лено-Анабарскому палеорифту, являющемуся продолжением Енисейско-Хатангской структуры. Его становление сопровождалось заложением глубоко проникающих разломов, по которым поступали наиболее глубинные щелочно-основные высокотитанистые расплавы, формировавшие Эбегаинский пояс трахидолеритовых даек [7]. Текстура пород порфировая с интерсергальной, офитовой и пилотакситовой структурой основной массы. В трахидолеритах доминирующим минералом-вкрапленником является титанистый клинопироксен (1–3% TiO_2).

Показательно высокое содержание апатита, окисно-рудных минералов и калиевого полевого шпата.

По химизму трахидолериты существенно отличаются от производных толеитовых магм. Они умеренно недосыщены кремнекислотой (содержание SiO_2 изменяется в пределах 42–46%) и характеризуются необычайно высоким содержанием TiO_2 (3,5–7%), P_2O_5 (1–2%), $FeO_{общ}$ (> 14%) и общей щелочности (4–7%), в основном за счет увеличения доли калия. На диаграмме SiO_2 – $(Na_2O + K_2O)$ фигуративные точки составов трахидолеритов располагаются в поле щелочных пород. По микроэлементному составу трахидолериты занимают обособленное положение, отличаясь от пород толеитового ряда более высокими концентрациями практически всех несовместимых элементов. Наиболее яркой геохимической чертой трахидолеритов является значительное содержание в них элементов группы титана – Zr, Nb, Hf, Ta и отчетливое обогащение крупноионными элементами – Cs, Ba, Rb, Sr, Pb, K. В трахидолеритах фиксируется максимальная сумма REE (до 672 ppm), характер распределения их отличается значительным фракционированием $(La/Yb)_n = 23$ и отсутствием Eu и Ta-Nb аномалий. По содержанию совместимых элементов Ni, Co, Cr, Sc, Cu они значительно уступают производным толеитовых расплавов.

Заключение

Таким образом, среди фанерозойских базитов восточной части Сибирской платформы по своим петрохимическим и геохимическим характеристикам четко выделяются позднепалеозойские-раннемезозойские платформенные магматиты трапповых синеклиз, образованные толеит-базальтовой серией расплавов. К рифтогенному магматизму относятся: среднепалеозойские базиты палеорифтовых зон толеитового состава с повышенным содержанием титана и щелочей и нижнетриасовые трахидолериты периферийных частей платформы, производные щелочной оливин-базальтовой серии магм с еще более высокой щелочностью и титанистостью.

Анализ отношений несовместимых элементов и P_2O_5 – TiO_2 (рис. 2) показывает, что составы фанерозойских базитов укладываются в тренд, протягивающийся от области составов E-MORB через OIB к более глубоким мантийным уровням. В качестве индикатора глубины плавления используется отношение $(Tb/Yb)_n$, которое выше значения 1,8 в магмах, формирующихся в присутствии граната (компонент OIB) и ниже его в менее глубинных расплавах – уровень шпинелевых лерцолитов (компонент E-MORB)

[8]. В траппах отношение $(\text{Tb/Yb})_n = 1,10 - 1,30 < 1,8$, т.е. источник расплава располагался на уровне устойчивости шпинели. Подтверждением этого является и положение спектров на спайдер-диаграммах и точек составов траппов на графиках парных отношений Zr , Nb , La/Yb к La , Gd/Yb-La/Sm , Hf-Zr , $\text{P}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$, где они формируют единую совокупность и близки к составу E-MORB. Можно также уверенно утверждать, что расплавы субщелочной толеит-базальтовой серии, формировавшей среднепалеозойские интрузии, соответствуют источнику типа OIB $(\text{Tb/Yb})_n = 1,50 - 2,48$. Базальты аппаинской свиты, тяготеющие к рифтовой долине, характеризуются спектрами составов, расположенными между составами OIB и E-MORB. Наиболее высокое отношение $(\text{Tb/Yb})_n = 3,20 - 3,27$ в трахидолеритах, сформированных щелочным оливин-базальтовым расплавом, свидетельствует о более глубинном положении магматического источника.

Литература

1. Олейников Б.В., Шпунт Б.Р., Томишин М.Д. Геодинамические обстановки проявлений базитового магматизма на Сибирской платформе в неогее // Магматические формации в геологической истории и структуре Земли. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – С. 86–108.
2. Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // Советская геология. – 1975. – № 10. – С. 49–58.
3. Олейников Б.В., Саввинов В.Т., Погудина М.А. Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской-нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилуйской синеклиз // Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы. – М.: Наука, 1973. – С. 4–75.
4. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилуйского авлакогена. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
5. Томишин М.Д., Киселев А.И., Копылова А.Г. Молодинский дайковый пояс среднепалеозойских долеритов на северо-востоке Сибирской платформы // Вестник ИргТУ. – 2010. – №2 (42). – С. 24–30.
6. Олейников Б.В., Томишин М.Д. Эволюция состава интрузивного базитового магматизма Сибирской платформы во времени // Траппы Сибири и Декана. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 39–63.
7. Томишин М.Д. Магматиты Эбеаинского дайкового пояса как возможный источник россыпных алмазов на северо-востоке Сибирской платформы // Доклады АН. – 2010. – Т. 431. – №1. – С. 78–80.
8. Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.L. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA // J. Geophys. Res. – 2002. – V.107, № B1.10.1029/2001JB000209.
9. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. Amer. Spec. Publ. – 1989. – V.42. – P. 313–345.

Поступила в редакцию 26.06.2015

УДК 550.83.016

Комплексирование геофизических методов при изучении строения золоторудного месторождения Базовское (СВ России)

Е.Э. Соловьев*, В.Ю. Фридовский**, В.А. Кычкин*

*Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

Показаны результаты геофизических работ на различных участках месторождения Базовское. В ходе исследований были апробированы возможности высокоточной магниторазведки, электроразведки методом срединного градиента и зондирования методом переходных процессов при выделении и прослеживании рудоконтролирующих структур, изучении геологического строения месторождения. Анализ геофизических материалов показал, что наиболее информативными являются электроразведочные методы. Зондирование методом переходных процессов позволяет в условиях плохих заземлений получить объемную информацию о глубинном геологическом строении исследуемого объек-

*СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович – к.г.-м.н., доцент, зав. каф., solov.evg@yandex.ru; **ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич – д.г.-м.н., проф., и.о. директора, 710933@list.ru; *КЫЧКИН Вадим Андреевич – ст. преподаватель, v.a.kychkin_14@mail.ru.

[8]. В траппах отношение $(\text{Tb/Yb})_n = 1,10 - 1,30 < 1,8$, т.е. источник расплава располагался на уровне устойчивости шпинели. Подтверждением этого является и положение спектров на спайдер-диаграммах и точек составов траппов на графиках парных отношений Zr , Nb , La/Yb к La , Gd/Yb-La/Sm , Hf-Zr , $\text{P}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$, где они формируют единую совокупность и близки к составу E-MORB. Можно также уверенно утверждать, что расплавы субщелочной толеит-базальтовой серии, формировавшей среднепалеозойские интрузии, соответствуют источнику типа OIB $(\text{Tb/Yb})_n = 1,50 - 2,48$. Базальты аппаинской свиты, тяготеющие к рифтовой долине, характеризуются спектрами составов, расположенными между составами OIB и E-MORB. Наиболее высокое отношение $(\text{Tb/Yb})_n = 3,20 - 3,27$ в трахидолеритах, сформированных щелочным оливин-базальтовым расплавом, свидетельствует о более глубинном положении магматического источника.

Литература

1. Олейников Б.В., Шпунт Б.Р., Томишин М.Д. Геодинамические обстановки проявлений базитового магматизма на Сибирской платформе в неогее // Магматические формации в геологической истории и структуре Земли. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – С. 86–108.
2. Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // Советская геология. – 1975. – № 10. – С. 49–58.
3. Олейников Б.В., Саввинов В.Т., Погудина М.А. Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской-нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилуйской синеклиз // Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы. – М.: Наука, 1973. – С. 4–75.
4. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилуйского авлакогена. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
5. Томишин М.Д., Киселев А.И., Копылова А.Г. Молодинский дайковый пояс среднепалеозойских долеритов на северо-востоке Сибирской платформы // Вестник ИргТУ. – 2010. – №2 (42). – С. 24–30.
6. Олейников Б.В., Томишин М.Д. Эволюция состава интрузивного базитового магматизма Сибирской платформы во времени // Траппы Сибири и Декана. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 39–63.
7. Томишин М.Д. Магматиты Эбеаинского дайкового пояса как возможный источник россыпных алмазов на северо-востоке Сибирской платформы // Доклады АН. – 2010. – Т. 431. – №1. – С. 78–80.
8. Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.L. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA // J. Geophys. Res. – 2002. – V.107, № B1.10.1029/2001JB000209.
9. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. Amer. Spec. Publ. – 1989. – V.42. – P. 313–345.

Поступила в редакцию 26.06.2015

УДК 550.83.016

Комплексирование геофизических методов при изучении строения золоторудного месторождения Базовское (СВ России)

Е.Э. Соловьев*, В.Ю. Фридовский**, В.А. Кычкин*

*Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

Показаны результаты геофизических работ на различных участках месторождения Базовское. В ходе исследований были апробированы возможности высокоточной магниторазведки, электроразведки методом срединного градиента и зондирования методом переходных процессов при выделении и прослеживании рудоконтролирующих структур, изучении геологического строения месторождения. Анализ геофизических материалов показал, что наиболее информативными являются электроразведочные методы. Зондирование методом переходных процессов позволяет в условиях плохих заземлений получить объемную информацию о глубинном геологическом строении исследуемого объек-

*СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович – к.г.-м.н., доцент, зав. каф., solov.evg@yandex.ru; **ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич – д.г.-м.н., проф., и.о. директора, 710933@list.ru; *КЫЧКИН Вадим Андреевич – ст. преподаватель, v.a.kychkin_14@mail.ru.

та. По данным зондирования методом переходных процессов установлено трехслойное строение геоэлектрического разреза месторождения. Магнитометрия в комплексе с электроразведочными данными дает возможность с большей достоверностью проводить геологическую интерпретацию геофизической информации. Установлено, что рудоконтролирующие структуры в электрических полях проявляются протяженными линейными аномалиями как пониженной, так и повышенной проводимости, что связано с особенностями минерализации. В магнитном поле минерализованные зоны дробления проявляются, в основном, линейными аномалиями отрицательного знака.

Ключевые слова: месторождение Базовское, золотое оруденение, электроразведка методом срединного градиента, зондирование методом переходных процессов, высокоточная магниторазведка, геофизические аномалии, геоэлектрический разрез.

The results of geophysical works in different areas of Bazovskoe deposit are given. The study tested possible Aggregation of Geophysical Methods During the Study of Structure of Bazovskoe Gold Deposit (North-Eastern Russia)

E.E. Soloviev *, V.Y. Fridovsky**, V.A. Kychkin*

* North-Eastern Federal University, Yakutsk

**Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

The results of geophysical works in different areas of Bazovskoe deposit are given. The study tested possibilities of high accurate magnetic prospecting, electric prospecting by median gradient and transient electromagnetic sounding when identifying and tracing ore-controlling structures, studying geological structure of the deposit. The analysis of the geophysical materials showed that methods of electric prospecting were the most informative. Transient electromagnetic sounding allows obtaining volume information on deep geologic structure of the studied object in bad grounding conditions. Three-layer structure of geoelectrical section of the deposit is identified according to transient electromagnetic sounding data. Magnetometry in combination with electric prospecting data makes possible to geologically interpret geophysical information with greater reliability. It is determined that, ore-controlling structures in electric fields are manifested by extended linear anomalies of decreased and increased conductivity, that is connected with mineralization features. In magnetic field, mineralized zones of crush are manifested, mainly, by negative linear anomalies.

Key words: Bazovskoe deposit, gold mineralization, electric prospecting by median gradient, transient electromagnetic sounding, high accurate magnetic prospecting, geophysical anomalies, geoelectrical section.

Введение

Наземные геофизические работы имеют важное значение при выявлении и прослеживании рудоконтролирующих структур, особенно перекрытых рыхлыми отложениями значительной мощности. На ряде рудных объектов их применение осложняется тем, что петрофизические свойства вмещающих толщ и пород рудных зон оказываются близкими. В таких случаях эффективность геофизических исследований может быть повышена комплексированием разных методов [1–4]. В работе показаны возможности магниторазведки и различных модификаций электроразведки при изучении геологического строения золоторудного месторождения Базовское (рис.1). Месторождение расположено в Эльгинском рудном узле Верхнеиндигирского золоторудного района. Прогнозные ресурсы золота месторождения по категориям $P_1 + P_2$ составляют 180 т [5].

Площадь работ сложена терригенными отложениями верхнего триаса черняйской свиты (Тз_{3г}), преимущественно песчаникового состава. Вверх по разрезу увеличивается количество песчаных алевролитов и алевролитов. Мощность пластов песчаников до 80 м, пластов алевролитов – 20–40 м. Основные разрывные нарушения имеют северо-западное простирание, согласное Адыча-Тарынскому (Адыча-Тенькинскому) разлому. На территории Базовского месторождения он представлен разломом Диагональный и многочисленными близпараллельными минерализованными зонами дробления, сопровождающимися жилами, прожилками, линзами, гнездами кварц-карбонатного состава, главным образом, в пластах песчаников и пачках переслаивания песчаников и алевролитов. Разлом Диагональный имеет северо-западное простирание и падение к северо-востоку, трасируется более чем на 15 км в юго-восточном

направлении. На месторождении широко развиты надвиговые деформации [6]. Они обычно приурочены к контактам пород различного состава (песчаники и алевролиты) и падают к северо-востоку под углами 30–60°. Наложенные деформации представлены сдвигами (лево- и правосторонними), в основном, наследующими положение ранних надвигов, а так же поперечными складками северо-восточного простирания.

Рудными телами месторождения Базовское являются минерализованные зоны дробления и смятия северо-западного простирания (Восточная, Центральная, Средняя, Западная), прослеженные при геологоразведочных работах на расстояние до 6,5 км. Минерализованные зоны мощностью до первых десятков метров выполнены милонитами, тектоническими брекчиями с кварцевыми жилами и прожилками. Они проявляются также интенсивными складчатыми и разрывными деформациями пород. В крыльях минерализованных зон широко развиты системы кварцевых жил и прожилков лестничного типа, приуроченные к пластам песчаников. Характерно ветвление рудных зон, чередование раздувов и пережимов. Оруденение принадлежит к малосульфидной золото-кварцевой формации. В рудах установлены арсенопирит, пирит, реже галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды и самородное золото.

В статье рассматриваются результаты геофизических работ, выполненных в 2004, 2005 и 2015 гг. на месторождении Базовское. Использование магниторазведки и различных модификаций электроразведки позволило изучить характеристики геофизических полей, уточнить геологическое строение отдельных участков и установить признаки рудоконтролирующих структур.

Материалы и методы исследований

Геофизические исследования проведены на северо-западном и юго-восточном флангах месторождения Базовское (рис.1). В состав комплекса геофизических методов входили наземная высокоточная магнитометрическая съемка и электроразведка в модификациях ЭП-СГ (электропрофилирование методом срединного градиента), ЗМПП (зондирование методом переходных процессов) и ДЭП (дипольное электрическое профилирование). В результате обработки полевых материалов выяснилось, что ДЭП крайне чувствительно к сложному рельефу дневной поверхности и в качестве поискового метода применяться не может.

Магниторазведка. Основная цель применения магниторазведки – уточнение положения магматических образований, установление раз-

рывных нарушений и определение зон гидро-термально измененных пород. Магнитометрическая съемка выполнялась с учетом стандартных методических приёмов – измерения и учет геомагнитных вариаций на контрольном пункте (КП), наблюдения значений магнитометров на КП – перед и после окончания маршрутной съемки, контроль и увязка значений магнитометров. Исследования проведены в площадном варианте с различным шагом наблюдений 5 и 10 м с однократными наблюдениями на рядовых точках. На контрольных точках и точках с аномальными значениями магнитного поля количество замеров увеличивалось до 3–4, за отсчет принималось среднее значение. Контрольные пункты устанавливались в «спокойном» месте с нормальными значениями магнитного поля, свободными от влияния техногенного «загрязнения». Обработка данных магниторазведки выполнена по стандартной методике:

$$\Delta T_{\text{аном}} = T_{\text{набл}} - T_{\text{КП}} \pm dT_{\text{магн}},$$

где $T_{\text{набл}}$ – наблюдаемые значения магнитного поля, $T_{\text{КП}}$ – значения магнитного поля на вари-



Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Базовское (Лупенко, 2007 г., с изменениями и дополнениями):

1–2 – аллювиальные отложения: 1 – современные, 2 – верхне- и среднечетвертичные; 3 – 4 – верхнетриасовые отложения черняйской свиты, Тзсг2: 3 – средняя подсвита, Тзсг2, 4 – нижняя подсвита, Тзсг1; 5 – дайки диорит-порфиров; 6 – разрывные нарушения: а – установленные, б – предполагаемые и скрытые под четвертичными отложениями; 7 – участки геофизических работ

ционной станции, $dT_{\text{магн}}$ – разница значений между магнитометрами.

Электропрофилирование методом срединного градиента (ЭП-СГ) используется для решения задач, направленных на выделение кварцевых жил и прожилково-жилых зон, дизъюнктивных структур, а также на выявление и прослеживание минерализованных зон дробления и литологической дифференциации горных пород. ЭП-СГ является одной из основных модификаций метода сопротивлений, отмечается высокой производительностью выполнения работ и экспрессной обработкой полученных данных. Работы осуществлялись на рабочей частоте 625 Гц, сила подаваемого тока не менее 10 А. Разносы установки составили: длина питающей линии АВ – 1000 м, приемной MN – 20 м. Глубинность исследований около 160–200 м ($\approx 1/4$ – $1/6$ от разноса АВ). Электропрофилирование проводилось отечественной аппаратурой ЭРА-МАХ, обладающей автоматической компенсацией ЭДС поляризации приемных электродов, контролем качества заземления и повышенной емкостью памяти.

Значения кажущегося сопротивления рассчитывались по формуле [7]:

$$\rho_k = \kappa \frac{\Delta U}{I},$$

где κ – геометрический коэффициент установки (в м), ΔU – разность потенциалов на приемных электродах MN, I – сила тока в линии АВ. Геометрический коэффициент установки рассчитывается по формуле:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\frac{1}{R_{AN}} - \frac{1}{R_{AM}} - \frac{1}{R_{BN}} + \frac{1}{R_{BM}}}.$$

Зондирование методом переходных процессов (ЗМПП) проводилось в модификации «петля в петле» (Q-q) в варианте срединного градиента для изучения глубоких горизонтов исследуемых территорий, уточнения положения и строения рудоконтролирующих структур. Параметры приемно-генераторной конструкции, установленные путем опытно-методических работ, составили: момент генераторной петли – 62500 м² (250х250 м), момент приемной рамки – 10 м², сила тока – 5 А, период подаваемого импульса – 10 мс. Шаг наблюдений – 10 м. Используемая аппаратура – телеметрическая электроразведочная станция «Импульс-Д».

Обработка данных ЗМПП проводилась в программе «АВС» (ООО «СибГеоТех») с последующим экспортом в программу SURFER для построения геоэлектрических разрезов. Предлага-

емый граф обработки данных ЗМПП следующий:

- построение графиков ЭДС равного времени («сшивка» пикетных данных в единый профиль);
- оформление паспорта данных (введение моментов приемной и генераторной петли, силы тока);
- обработка данных – осреднение, применение медианного и экспоненциального фильтра;
- расчет значений кажущейся продольной проводимости (S_τ) и кажущегося электрического сопротивления (ρ_τ) в зависимости от глубины (H_τ) по формулам [8]:

$$S_{\tau}(\varepsilon_i) = \frac{2}{\mu} \left(\frac{2\pi}{3\mu M_G M_H} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{t_{i+1} - t_i}{(1/\varepsilon_{\varphi i+1})^{1/4} - (1/\varepsilon_{\varphi i})^{1/4}} \right),$$

$$\rho_\tau = \left(\frac{M_G \cdot M_H \cdot J}{20\pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot E(t)} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\mu_0}{t} \right)^{5/3},$$

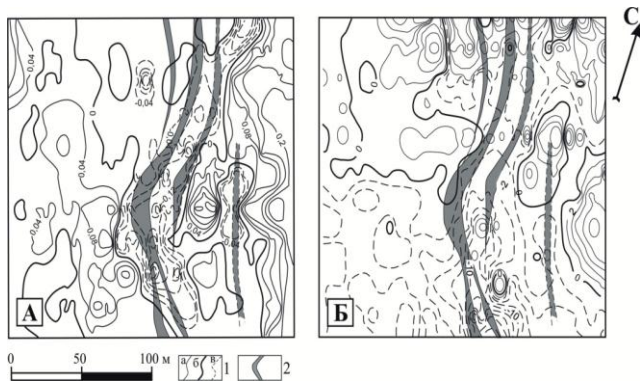
$$H_{\tau}(\varepsilon_r) = \left(\frac{3M_G M_H}{16\pi S_{\tau} \varepsilon_{ri}} \right)^{1/3} - \frac{t_i}{\mu S_{\tau i}},$$

где M_G – момент генератора, M_H – момент измерителя, J – ток (А), t – время (с), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, E – ЭДС (В), μ – магнитная проницаемость среды, ε_φ – диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_r = \pi R^2 B$ – ЭДС радиальной магнитной компоненты поля;

- экспорт данных в программу SURFER, создание grd – файлов;
- построение геоэлектрических разрезов и графиков ЭДС по времени.

Результаты и обсуждение

С целью установления проявления рудоконтролирующих структур в геофизических полях в 2004 г. были проведены опытно-методические работы на локальном участке зоны Восточная. Комплекс включал детальную магниторазведку и электроразведку методом ЗМПП по сети 20х5 м. Исследования показали, что рудной зоне Восточная соответствует линейная аномалия э.д.с. в интервале времен 30–50 мкс, шириной до 30 м, с условными значениями (–0,08) – (–0,36) мВ (рис. 2). В аномальном магнитном поле зона выделяется линейной аномалией отрицательного знака интенсивностью от –10 до –40 нТл. Полученные результаты полевых работ позволили рекомендовать магниторазведку и ЗМПП, как поисковые геофизические методы при выделении минерализованных зон дробления месторождения Базовское [1].



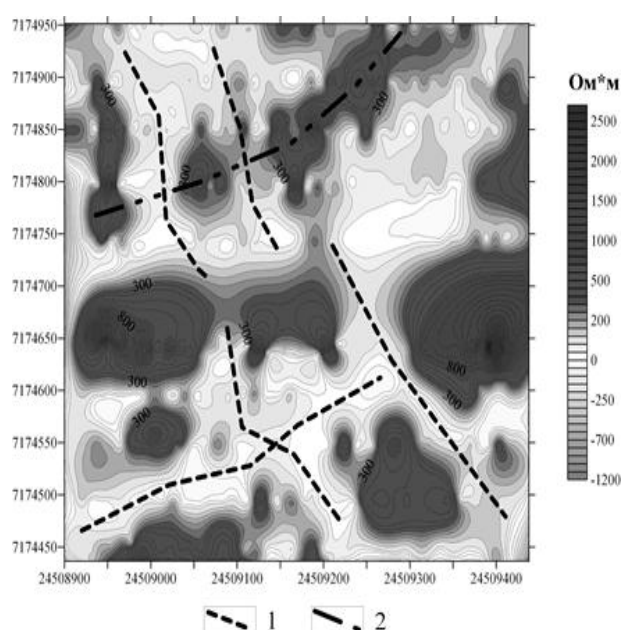


Рис. 5. Схема изолиний кажущегося удельного электрического сопротивления юго-восточного фланга месторождения Базовское:

1 – 2 – оси аномальных зон: 1 – с низкими значениями, 2 – с высокими значениями

низкой электропроводности хорошо коррелируются с минерализованными зонами.

В 2015 г. геофизические исследования проведены на юго-восточном фланге месторождения Базовское. Применены электроразведка методом срединного градиента и высокоточная магниторазведка. Аномальное электрическое поле свидетельствует о сложном и неоднородном строении исследуемого участка (рис. 5). В северной части площади отмечается линейная зона высоких значений кажущегося сопротивления северо-северо-восточной ориентировки. Аномалия пространственно коррелируется с дайкой диоритовых порфириров (дл J_3). По нарушению изолиний геоэлектрических аномалий, высокоградиентным зонам и пониженным значениям кажущегося сопротивления выделены линейные структуры северо-западной и северо-северо-восточной ориентировок. Геоэлектрические аномалии, учитывая их проводящие характеристики, вероятно, вызваны элементами разрывной тектоники субсогласными и секущими пласты песчаников. Поисковый интерес вызывают нарушения северо-западной ориентировки и узлы их пересечения с разрывами северо-восточной ориентировки, где можно ожидать проявление рудной минерализации.

Магнитное поле исследуемого участка имеет мозаичное строение, характеризуется слабой интенсивностью от -36 до 15 нТл (рис. 6). По-

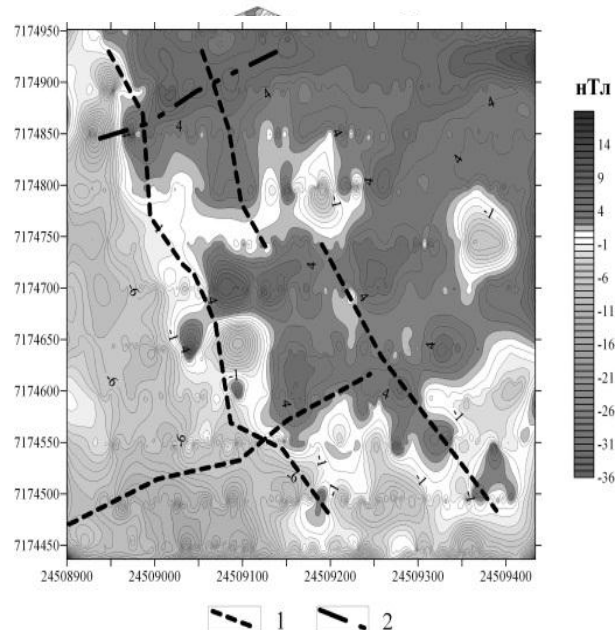


Рис. 6. Схема изолиний аномального магнитного поля юго-восточного фланга месторождения Базовское:

Усл. Обозначения те же, что на рис. 5

ложительные значения магнитного потенциала представлены, в основном, обособленными локальными аномалиями изометричной формы. Дайка диоритовых порфириров выделяется линейной аномалией. Обширные зоны отрицательных значений аномального магнитного поля в западной и южной частях изучаемой площади соответствуют участкам развития рыхлых четвертичных отложений.

Заключение

Эффективность геологоразведочных работ при поисках золотого оруденения во многом зависит от использования комплекса геофизических исследований, особенно в условиях закрытых территорий, где требуются значительные объемы поверхностных выработок и бурения. Многообразие типов золотого оруденения, изменения структурных особенностей размещения обуславливают необходимость выполнения опытно-методических работ на каждом изучаемом объекте для выбора оптимального поискового комплекса геофизических методов. Проведенные исследования на различных участках месторождения Базовское показали, что ведущим поисковым методом при выделении и прослеживании рудоконтролирующих структур является электроразведка в различных модификациях. Использование магнитометрической съемки носит, в основном, вспомогательный

характер, позволяя в комплексе с электроразведочными данными с большей достоверностью проводить геологическую интерпретацию геофизической информации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00465) и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ-Дальний Восток (проект №15-45-05094 p_восток_a).

Литература

1. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю., Кычкин В.А. Геофизические признаки контроля золоторудных месторождений в зонах разломов // Руды и металлы. – 2012. – № 5. – С. 51–57.
2. Тарасов В.А., Емжуев М.С., Парада С.Г., Столяров В.В. Геофизические методы при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырныаузского рудного узла // Вестник ВГУ. Серия Геология. – 2015. – № 1. – С. 109–117.
3. Соловьев Е.Э., Кычкин В.А. Геофизические ис-

следования рудоконтролирующих структур Тарынского рудного узла // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 12. – С. 36–38.

4. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю. Импульсная электроразведка при изучении строения рудных районов // Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. – С. 362–365.

5. Золоторудные месторождения России // Акварель. – М., 2010. – С. 365.

6. Фридовский В.Ю. Анализ деформационных структур Эльгинского рудного узла (Восточная Якутия) // Отечественная геология. – 2010. – № 4. – С. 39–45.

7. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. – Л.: Недра, 1984. – С. 352.

8. Ним Ю.А., Омеляненко А.В., Стогний В.В. Импульсная электроразведка в условиях криолитозоны. – Новосибирск: СО РАН, 1994. – С. 188.

Поступила в редакцию 30.09.2015

УДК 550.832

Изучение показателей качества углей и горно-геологических условий разработки угольных месторождений по результатам геофизических исследований скважин

Н.Н. Гриб*, В.М. Никитин**

**Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета, г. Нерюнгри*

***Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск*

Описываются методы определения зольности угля по селективному микрогамма – гамма-каротажу на основе установленных корреляционных связей геофизического параметра с зольностью, а также метод, основанный на многофункциональных связях зольности углей с их геофизическими параметрами. Рассмотрена схема математического моделирования показателей качества углей с использованием математического аппарата Марковских процессов. Предложены перспективные направления изучения физико-механических свойств в массиве горных пород и прогноза устойчивости боковых пород по полученным сведениям о физико-механических свойствах массива по результатам геофизических исследований скважин.

Ключевые слова: уголь, показатели качества, физико-механические свойства, геофизические методы.

The Research of Coal Quality and Mining-Geological Conditions of Coal Deposits Development on the Results of Borehole Survey

N.N. Grib, V.M. Nikitin

**Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Neryungri*

***Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk*

The methods of coal ash content determination by selective micro-gamma-gamma ray logging, on the basis of established correlative relationship of geophysical parameter and ash content, as well as the method based

*ГРИБ Николай Николаевич – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зам. директора по научной работе, nfygu@mail.ru;

**НИКИТИН Валерий Мефодьевич – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС(Я), председатель Южно-Якутского НЦ АН РС(Я).

характер, позволяя в комплексе с электроразведочными данными с большей достоверностью проводить геологическую интерпретацию геофизической информации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00465) и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ-Дальний Восток (проект №15-45-05094 p_восток_a).

Литература

1. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю., Кычкин В.А. Геофизические признаки контроля золоторудных месторождений в зонах разломов // Руды и металлы. – 2012. – № 5. – С. 51–57.
2. Тарасов В.А., Емжуев М.С., Парада С.Г., Столяров В.В. Геофизические методы при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырныаузского рудного узла // Вестник ВГУ. Серия Геология. – 2015. – № 1. – С. 109–117.
3. Соловьев Е.Э., Кычкин В.А. Геофизические ис-

следования рудоконтролирующих структур Тарынского рудного узла // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 12. – С. 36–38.

4. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю. Импульсная электроразведка при изучении строения рудных районов // Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. – С. 362–365.

5. Золоторудные месторождения России // Акварель. – М., 2010. – С. 365.

6. Фридовский В.Ю. Анализ деформационных структур Эльгинского рудного узла (Восточная Якутия) // Отечественная геология. – 2010. – № 4. – С. 39–45.

7. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. – Л.: Недра, 1984. – С. 352.

8. Ним Ю.А., Омеляненко А.В., Стогний В.В. Импульсная электроразведка в условиях криолитозоны. – Новосибирск: СО РАН, 1994. – С. 188.

Поступила в редакцию 30.09.2015

УДК 550.832

Изучение показателей качества углей и горно-геологических условий разработки угольных месторождений по результатам геофизических исследований скважин

Н.Н. Гриб*, В.М. Никитин**

**Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета, г. Нерюнгри*

***Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск*

Описываются методы определения зольности угля по селективному микрогамма – гамма-каротажу на основе установленных корреляционных связей геофизического параметра с зольностью, а также метод, основанный на многофункциональных связях зольности углей с их геофизическими параметрами. Рассмотрена схема математического моделирования показателей качества углей с использованием математического аппарата Марковских процессов. Предложены перспективные направления изучения физико-механических свойств в массиве горных пород и прогноза устойчивости боковых пород по полученным сведениям о физико-механических свойствах массива по результатам геофизических исследований скважин.

Ключевые слова: уголь, показатели качества, физико-механические свойства, геофизические методы.

The Research of Coal Quality and Mining-Geological Conditions of Coal Deposits Development on the Results of Borehole Survey

N.N. Grib, V.M. Nikitin

**Technical Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Neryungri*

***Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk*

The methods of coal ash content determination by selective micro-gamma-gamma ray logging, on the basis of established correlative relationship of geophysical parameter and ash content, as well as the method based

*ГРИБ Николай Николаевич – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зам. директора по научной работе, nfygu@mail.ru;

**НИКИТИН Валерий Мефодьевич – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС(Я), председатель Южно-Якутского НЦ АН РС(Я).

on multifunctional relationships of coal ash content with its geophysical data are considered. The mathematical modeling scheme of coal quality indicators based on the usage of Markovian processes mathematical tool is also considered. Prospective lines of physic-mechanical properties survey in the rock mass and prediction of rock wall stability according to the received data on physic-mechanical mass properties on the results of borehole survey are offered.

Key words: coal, quality indicators, physical-mechanical properties, geophysical methods.

Промышленно-экономическую ценность и конкурентоспособности углей во многом определяют их показатели качества и горно-геологические условия разработки месторождений. Угольные месторождения Южно-Якутского бассейна отличаются сложностью горно-геологических условий: наличие островной многолетней мерзлоты, мощные угольные пласты сложного строения, изменчивость показателей качества углей и физико-механических свойств (ФМС) углевмещающих пород, как по площади месторождений, так и с глубиной залегания угольных пластов и т. д. В связи с этим повышаются требования к изучению показателей качества углей, литологического состава и ФМС углевмещающих пород.

При разведке и разработке угольных месторождений одним из важнейших показателей качества угольных пластов, определяющих их кондиционность при подсчете запасов, является зольность. Поэтому первые работы по изучению свойств угленосного массива в Южно-Якутском бассейне были направлены на разработку геолого-геофизических методов изучения зольности угольных пластов.

Изучение зольности угольных пластов в их естественном залегании

В основе методов определения зольности (A^d) угольных пластов по геофизическим данным лежат существующие корреляционные связи A^d с изучаемыми геофизическими параметрами процессов распространения и взаимодействия физических полей с углями, которые устанавливаются для конкретных месторождений угленосных районов.

Определение зольности пластов угля по данным селективного микрогамма-гамма-каротажа (мГГК-С). Первым этапом при определении зольности является установление зависимости между геофизическим параметром и зольностью.

В результате выполненных исследований была установлена следующая зависимость:

$$A^d = 94,96 \cdot \text{EXP}(-2,11 \cdot (I_{om})) \quad (1)$$

– между геофизическим параметром и зольностью существует тесная связь. Коэффициент корреляции ($R_0 = 0,92 \pm 0,01$). Случайные погрешности ($\sigma = 2,884\%$ абс., $\delta = 11\%$), при от-

сутствии систематически значимой погрешности ($t_d \leq t_{0,05} = 1,96$);

– установленная зависимость имеет универсальный характер для Южно-Якутского бассейна, т.е. ею можно руководствоваться при определении зольности углей на разных месторождениях по данным мГГК-С; изменение типа аппаратуры не вносит искажений в характер зависимости;

– зависимость геофизического параметра от зольности имеет нелинейный характер, что приводит к определенным трудностям при интерпретации. Нельзя для определения зольности угольных пластов рассчитывать среднюю величину I_{om} при большой изрезанности кривых. Необходимо пласт разбивать на однородные пакки, в пределах которых коэффициент вариации параметра $W(I_{om}^{N-C}) < 20\%$, для каждой пакки определяется зольностью A^d по установленной зависимости. Среднепластовая зольность определяется по формуле:

$$A^d = \sum A_i^d \cdot h_i \cdot \delta_i / \sum h_i \cdot \delta_i, \quad (2)$$

где δ_i , h_i – плотность и мощность i -й пакки.

Определение зольности угольных пластов по комплексу геофизических методов: гамма-каротаж + электрический каротаж + кавернометрия (ГК + σ_k + КМ). Несмотря на хорошие результаты метода мГГК-С он имеет ограниченное применение в скважинах со сложными горнотехническими условиями. В пределах Южно-Якутского бассейна ранее предпринимались попытки разработки методики определения A^d по данным ГК, но они не дали обнадеживающих результатов по причине изменчивости вещественного состава минеральных примесей от петрографического типа угля и влияния изменчивости вещественного состава минеральных примесей на геофизические параметры. Изучив влияние состава минеральных примесей на геофизические параметры (интенсивность естественного гамма-излучения (I_γ), кажущуюся электропроводность (σ_k), приходим к выводу, что для решения задач определения зольности угольных пластов их необходимо использовать в комплексе для взаимной корректировки в ха-

рактуре связи $A^d = f(I\gamma, \sigma_k)$ в зависимости от петрографического состава углей и изменения вещественного состава минеральных примесей в них [6]. Так с уменьшением содержания кремнезема и увеличением содержания каолинита в угле проводимость его возрастает. Естественная радиоактивность угля возрастает с увеличением содержания в нем фюзенита. Поэтому для учета влияния указанных выше факторов используются многофункциональные связи зольности углей с геофизическими параметрами. В результате экспериментально была получена функция:

$$A^d = a \cdot e^{(a \cdot I\gamma h)}, \quad (3)$$

где $a = 0,0538 \cdot \delta I\gamma h + 0,932 = 0,0538 \cdot I\gamma h / I\gamma_{cp} + 0,932$,
 $e = \partial \cdot e^{(c \cdot I\gamma h)}$,
 $\partial = 0,0082 \cdot \delta \sigma_k + 0,755 = 0,0082 \sigma_k + 0,755$,
 $c = -0,0685$,

$I\gamma h$ – исправленное значение естественной радиоактивности (внесены поправки, учитывающие искажающее влияние ограниченной мощности, скорости, диаметра скважины и бурового раствора);

$I\gamma_{cp}$, σ_{kcp} – средние значения геофизических параметров по углю. Уровень сигнала на высокозольном угле ($A^d \approx 50\%$) принят для $I\gamma_{cp} = 7$ мкР/ч, для $\sigma_{kcp} = 3$ мСм/м. Среднепластовая зольность рассчитывается по формуле 2.

Достоверность определения зольности по геофизическому комплексу методов составляет: среднеквадратическая погрешность (абсолютная $\sigma = 1,8 A^d\%$ абс., относительная $\delta = 6,2\%$ отн.) при незначимости систематической погрешности.

Развитие геофизической аппаратуры и широкое внедрение в геологоразведочную практику электронной вычислительной техники позволило прийти к разработке новых методик, позволяющих использовать возможности ЭВМ для моделирования свойств, строения, состава и состояния массива горных пород и разработать методологию решения сложных геотехнических задач.

Одной из них для Южно-Якутского каменноугольного бассейна явилась геолого-геофизическая технология прогнозирования показателей качества углей.

Прогнозирование показателей качества углей

В основу технологии геолого-геофизического прогнозирования показателей качества углей положено системное представление массива горных пород и динамика его формирования и преобразования.

Физико-геологическая сущность массива

горных пород, как системы, определяется четырьмя основными категориями: **состав, строение, состояние и свойства**. Графически схема системного представления массива горных пород выражается в виде информационного тетраэдра, вершины которого соответствуют 100%-й информации о составе, строении, состоянии и свойствах. Исследуя объект через его свойства, получаем набор данных, содержащих информацию об объекте, на основании которой создается информационная модель объекта при помощи которой прогнозируются состав, строение и состояние объекта [5].

Одним из способов изучения систем является использование методов многофакторного динамического моделирования, для которого наиболее перспективно применение математического аппарата Марковских процессов.

Построение модели показателей качества углей на участке исследования начинается с конкретизации переменных (определения системы объекта), входящих в вектор Марковской модели. Вектор переменных (система) состоит из 2 групп числовых последовательностей (подсистем), отражающих факторы формирования показателей качества – генетические и эпигенетические:

[вектор генетических факторов] [вектор эпигенетических факторов].

Вектор генетических факторов представляет собой последовательность чередования формализованных значений основных литотипов пород и углей в последовательности слоев, включающих исследуемый угольный пласт. Такая группа слоев, несущая информацию о предыстории и послееистории образования угольного пласта, названа «пакетом». Границы пакета в нашем толковании определяются информативностью системы.

Следующий этап формализации заключается в определении ранговых значений переменных. Для боковых пород принята следующая индексация литотипов: {1} – уголь; {2} – углистый аргиллит; {3} – аргиллит; {4} – аргиллит алевроитовый; {5} – алевролит; {6} – песчаник; {7} – известняк.

Исследуемый угольный пласт индексируется значениями, характеризующими зольность угольного пласта. С этой целью шкала значений зольности разбивается на N интервалов. Например, при диапазоне изменения зольности от 5 до 40%, для значений $A^d < 10\%$ присваивается индекс {8}; $A^d = [10,1-15\%]$ – {9}; $A^d = [15,1-20\%]$ – {10}; $A^d = [20,1-30\%]$ – {11}; $A^d > 30,1\%$ – {12}. Интервалы индексации зольности конкретизируются для фактического распределения этого параметра на исследуемом участке.

Таким образом, мы имеем вектор генетической составляющей, описывающий литологическую последовательность слоев в почве угольного пласта (3 слоя), угольный пласт (индекс зольности) и 3 слоя в кровле угольного пласта. Для полной характеристики вектора генетической составляющей он дополняется значениями мощности (в метрах) непосредственной почвы, угольного пласта и непосредственной кровли.

Вектор эпигенетических факторов определяет положение пластопересечения в трёхмерных координатах геологического пространства (X, Y, Z), где X, Y – индексированные значения координат скважины на плане (геологической карте) участка, а Z – индексированное значение абсолютной глубины пластопересечения.

Индексация эпигенетических факторов определяется следующими условиями:

1. Индексация начинается с цифры 13 (индексы с 1 по 12 зарезервированы за векторами генетических факторов).

2. Количество индексов, отведенное для вектора эпигенетических факторов, составляет 16. Это определяется тем, что суммарное количество индексов в модели качества принято равным 28 (число 28 регламентируется памятью компьютера).

3. Индексация Z определяется количеством выделенных интервалов на шкале глубин (до десяти). Оставшиеся индексы пропорционально разносятся между координатными осями X и Y .

Таким образом, исследуемое пластопересечение в пространстве геологических признаков и в координатах месторождения (в массиве) описывается вектором:

$$X \Rightarrow Y \Rightarrow Z \Rightarrow L1 \Rightarrow L2 \Rightarrow L3 \Rightarrow A^d \Rightarrow L5 \Rightarrow L6 \Rightarrow L7 (h3, h4, h5),$$

где X, Y, Z – индексы координат; $L1...L7$ – индексы литотипов в почве и кровле угольного пласта; A^d – индекс зольности; $h3, h4, h5$ – значения мощности непосредственной почвы угольного пласта или пачки и непосредственной кровли.

Такой вектор можно рассматривать как совокупность независимых переменных. В качестве параметров принимаются значения технологических свойств углей – неотрицательные числа.

Источники информации для получения переменных и параметров:

а) переменные: Z – шкала глубин на геофизической диаграмме, X, Y – координаты скважины на геологической карте (плане); $L1...L7$ – литологическая колонка по геофизическим исследованиям скважин (ГИС) на сводной геофизической диаграмме, A^d – индекс

зольности, определенной по данным геофизических методов, $h3, h4, h5$ – мощности по данным ГИС;

б) параметры (моделируемые технологические свойства) по данным лабораторных анализов.

Из совокупности подготовленных векторов переменных и параметров (прогнозируемых свойств углей) формируется файл модельных данных, который используется для построения математической модели показателей качества углей программой *Vprognoz*. При применении данной модели рассчитывается для каждого вектора анализируемых данных прогноз показателей качества углей.

Анализ сопоставлений результатов определения показателей качества углей по лабораторным пробам и результатов прогноза на Нерюнгринском месторождении показал, что характеристики модели адекватны характеристикам реального объекта. Так относительные погрешности составили $A^d(k) - 5,45$; $A^d(y) - 7,95$; $W^a - 10\%$; $V^{daf} - 5,68\%$; $Y - 8,8\%$; средняя квадратическая погрешность – $A^d(k) - 0,4$; $A^d(y) - 1,61$; $W^a - 0,1\%$; $V^{daf} - 0,71\%$; $Y - 1,31\%$.

Технология прогноза горно-геологических условий разработки угольных месторождений

Данная технология включает в себя методы изучения литологического состава углевмещающих пород, их ФМС и прогнозирования устойчивости горных пород по геолого-геофизическим данным.

В пределах массива горных пород каждый литологический тип характеризуется не только определенным гранулометрическим составом, соотношением глинистого, карбонатного и кластического материала, но и определенной степенью вторичных изменений (эпигенетических) их физических свойств.

Интерпретация материалов геофизических исследований углеразведочных скважин осуществляется на основе петрофизических закономерностей, установленных в параметрических скважинах [2].

В основе интерпретации ГИС лежит петрофизическая модель:

$$\begin{aligned} \Delta t_p &= \Delta t_p^{\phi} C_{\phi} + \Delta t_p^{opz} C_{орг} + \\ &+ \Delta t_p^{кл} C_{кл} + \Delta t_p^{гг} C_{гг} + \Delta t_p^{кар} C_{кар}, \\ \delta_0 &= \delta_{\phi} C_{\phi} + \delta_{орг} C_{орг} + \delta_{кл} C_{кл} + \delta_{гг} C_{гг} + \delta_{кар} C_{кар}, \quad (4) \\ I_{\gamma} &= I_{\gamma}^{\phi} C_{\phi} + I_{\gamma}^{opz} C_{орг} + I_{\gamma}^{кл} C_{кл} + I_{\gamma}^{гг} C_{гг} + I_{\gamma}^{кар} C_{кар}, \\ \sigma_{п} &= \sigma_{\phi} C_{\phi} + \sigma_{орг} C_{орг} + \sigma_{кл} C_{кл} + \sigma_{гг} C_{гг} + \sigma_{кар} C_{кар}, \end{aligned}$$

$$C_{\phi} + C_{орг} + C_{кл} + C_{гг} + C_{кар} = 1, \quad (5)$$

где $\Delta t_p, \Delta t_p^{\phi}, \Delta t_p^{орг}, \Delta t_p^{кл}, \Delta t_p^{зл}, \Delta t_p^{кар}, \delta_0, \delta_{\phi}, \delta_{орг}, \delta_{кл}, \delta_{зл}, \delta_{кар}, I_{\gamma}, I_{\gamma}^{\phi}, I_{\gamma}^{орг}, I_{\gamma}^{кл}, I_{\gamma}^{зл}, I_{\gamma}^{кар}, \sigma_{\phi}, \sigma_{ф}, \sigma_{орг}, \sigma_{кл}, \sigma_{зл}, \sigma_{кар}$ – коэффициенты уравнений, имеющие физический смысл, соответственно: интервального времени распространения продольной волны, объемной плотности, интенсивности естественного гамма-излучения и удельной электрической проводимости флюида и компонентов породы (органического, обломочного, глинистого и карбонатного материала);

$C_{\phi} + C_{орг} + C_{кл} + C_{зл} + C_{кар}$ – искомые величины объемного содержания флюида и компонентов породы.

Решение системы петрофизических уравнений выполняется методом последовательных приближений. В качестве начального приближения принимаются значения компонент C_i , имеющего вид:

$$C_i = a_0 + a_1 f(V_p) + a_2 f(\delta_0) + a_3 f(I_{\gamma}) + a_4 f(\sigma_n), \quad (6)$$

где a_j ($0 \leq j < 4$) – коэффициенты многочлена, определяемые по данным петрофизических и петрографических исследований пород параметрических скважин; $f(V_p), f(\delta_0), f(I_{\gamma}), f(\sigma_n)$ – функции геофизических параметров.

Опробование геолого-геофизического метода изучения литологии в разрезах скважин выполнено на участке Локучаки Чульмаканского месторождения.

Абсолютная среднеквадратическая погрешность определения вещественного состава песчанников и алевролитов по геолого-геофизическому методу составила 4,8% для кластического материала, 3,7% для глинистого материала и 5,6% для карбонатного материала, т.е. находится в пределах точности их определения по шлифам. Поэтому разработанный метод успешно применен в дальнейших исследованиях при изучении литологии углевмещающих пород в процессе прогноза горно-геологических условий эксплуатации месторождений.

Физико-механические свойства горных пород и скорость распространения упругих волн в них зависят в основном от одних и тех же факторов, однако, проявляются они неодинаково. ФМС пород в меньшей степени зависят от вещественного состава кластического материала, а определяют в основном типом и составом цемента, сцементированностью зерен литотипов, структурно-текстурными особенностями горных пород.

Наиболее объективные сведения о физико-механических свойствах массива можно получить при изучении их в естественном залегании горных пород с использованием данных ГИС. Акустические параметры характеризуют закономерности распространения в породах знако-

переменных упругих деформаций, поэтому они имеют тесные корреляционные связи с физико-механическими свойствами и функционально связаны между собой.

Объемная плотность δ_0 определялась по данным плотностного гамма-гамма-каротажа с точностью $\pm 0,05$ г/см³. Если данные плотности по гамма-гамма-каротажу отсутствуют, то их рассчитывают по формулам:

– для пород, вмещающих марки каменного угля:

$$\delta_0 = -\hat{E}_{\delta} \cdot \Delta t_p / (1 - 0,065 \lg H) + 2,96 \text{ г/см}^3, \quad (7)$$

– для углистых пород и углей марок каменного угля:

$$\delta_0 = -\hat{E}_{\delta} \cdot \Delta t_p / (1 - 0,065 \lg H) + 3,4 \text{ г/см}^3, \quad (8)$$

$\hat{E}_{\delta}$ – коэффициенты, зависящие от степени литификации пород и конкретных геолого-геофизических условий исследуемой площади.

Прочностные свойства горных пород и скорость распространения упругих волн в них зависят в основном от одних и тех же факторов, однако, проявляются они неодинаково. Особенно большое влияние на прочность пород оказывают тип и состав цемента, сцементированность зерен литотипов, структурно-текстурные особенности горных пород. Одним из основных факторов, связанных с прочностными свойствами, является комплексный модуль $M_{СТ}$ – модуль слойчатости–трещиноватости, характеризующийся количеством слойков-трещин на 1м и углом их наклона.

Корреляционные уравнения связи прочностных свойств с акустическими параметрами имеют многомерный характер, учитывающие как кинематические параметры упругих волн (V_p, V_s), так и динамические (α_p, α_s), а также глубину исследуемого интервала, углы падения пластов, коэффициент, учитывающий степень литификации.

При установлении связей между геофизическими параметрами и прочностными характеристиками пород угольных месторождений Южно-Якутского бассейна анализировались уравнения [4]:

$$M_{cm} = 1,66 / (1 - b \lg H) \cdot (K_f \alpha_p - a \Delta T_p + b), \quad (9)$$

$$\sigma_{сж} = K_1 [10^{0,355 V_p (1 - 0,065 \lg H) - 0,0405 M_{cm}^{0,55}} + 6,6 (10^{-0,0405 M_{cm}^{0,55}} - 0,05)^{\sin \varphi} + 0,065^{(1 - \cos \varphi)}] \quad (10)$$

$$\sigma_p = K_1 [10^{0,363 V_p (1 - 0,065 \lg H) - 0,0405 M_{cm}^{0,55}} + 5,7 (10^{-0,0405 M_{cm}^{0,55}} - 1)^{(1 - \cos \varphi)}], \quad (11)$$

где K_f – частотный коэффициент, зависящий от типа применяемой аппаратуры; H – глубина исследуемого интервала; ΔT_p – интервальное время распространения продольных волн, мкс/м; α_p – коэффициент затухания продольной волны, дБ/м; φ – угол падения пород, рад; $\sigma_{сж}$, σ_p – пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении; K_1 , a , a' , b , b' – коэффициенты, зависящие от степени литификации пород и конкретных геолого-геофизических условий исследуемой площади.

По результатам исследований параметрических скважин, где выполнены акустический каротаж и экспрессное опробование ФМС, расчетные и определенные свойства при испытаниях образцов керна различаются между собой менее 20% при статистически незначимой систематической погрешности.

Акустический каротаж выполняется в ограниченном числе скважин и возможен только в интервалах скважин, заполненных промысловой жидкостью. Поэтому в Южно-Якутском бассейне выполнены исследования и разработаны методы изучения физико-механических свойств углевмещающих пород с использованием данных рационального комплекса ГИС, которыми охватываются 100% скважин.

Основным положением методов является соответствие стадии литификации угленосных пород соответствующей стадии метаморфизма углей и необратимость физико-механических свойств пород, приобретенных в момент максимального погружения.

Учитывая, что в условиях Южно-Якутского бассейна на петрофизические свойства в значительной степени влияет фациально-стратиграфический фактор, обязательным является гамма-каротаж, поскольку величина естественного радиационного поля массива в целом не зависит от постседиментационных преобразований.

С прочностными свойствами пород коррелирует их способность к разрушению при бурении, что находит свое косвенное отображение в изменении фактического диаметра скважин, поэтому при разработке методов использовались данные кавернометрии.

Как отмечалось выше, интенсивность естественного гамма-излучения I_γ не претерпевает практически изменений при эпигенетических преобразованиях пород и криогенных процессах. Поэтому данные ГК позволяют оценить глинистость и литологический состав, которые оказывают доминирующее влияние на прочностные свойства горных пород, слагающих разрезы скважин, пробуренных в многолетнемерзлых породах.

Для уточнения литологического состава и зон дробления горных пород применяется каротаж магнитной восприимчивости, так как на магнитную восприимчивость горных пород не оказывают влияние криогенные процессы [3].

Структурно-текстурные особенности разреза оцениваются по данным кавернометрии. Данные об изменении диаметра скважины в процессе бурения можно рассматривать как интегральную характеристику прочностных свойств пород.

Из анализа материалов кавернометрии следует, что при одинаковых условиях бурения наблюдается увеличение диаметра скважины: а) с повышением содержания в породе органических примесей; б) с увеличением содержания глинистого цемента; в) с уменьшением содержания карбонатного цемента, эти же факторы отражаются и на диаграммах ГК уменьшением или увеличением интенсивности естественного гамма-излучения. При этих же условиях происходит изменение пределов прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и одноосное растяжение σ_p . Так для Эльгинского каменноугольного месторождения уравнения для определения $\sigma_{сж}$ и σ_p мерзлых горных пород имеют вид:

$$\sigma_{сж} = 0,4605 \cdot 10^{4,1 - \frac{d_\phi - 0,5\Delta H^{-0,63}}{d_H}} + 0,4605 \cdot 10^{-2,3\Delta I_\gamma + 3,1}, \quad (12)$$

$$\sigma_p = 0,49 \cdot 10^{3,1 - \frac{d_\phi - 0,5\Delta H^{-0,63}}{d_H}} + 0,5 \cdot 10^{-2,3\Delta I_\gamma + 2,1}, \quad (13)$$

где ΔH – разность между глубиной скважины и глубиной, на которой производятся измерения; ΔI_γ – нормированное значение естественной радиоактивности в относительных единицах.

Из статистического анализа результатов изучения прочностных свойств пород ГИС-2 на Эльгинском месторождении следует, что при отсутствии систематически значимых погрешностей относительные случайные средние квадратические погрешности ниже 20%.

Разработанные выше методы позволили прогнозировать устойчивость углевмещающих пород по геолого-геофизическим данным. Использование физических параметров угленосных пород в качестве индикаторов их устойчивости обосновано следующими факторами. Увеличение скорости распространения упругих волн и удельного электрического сопротивления пород обусловлено повышением содержания в них карбонатного цемента и уменьшением пористости, что одновременно служит и фактором повышения устойчивости этих пород. Повышение электрической проводимости, интенсивности

естественного и рассеянного гамма-излучений пород связано с повышением пористости и содержания в них глинистого цемента, что одновременно является причиной ослабления их устойчивости.

Неустойчивые и легкообрушаемые породы кровли сопровождаются значительным увеличением диаметра скважин в процессе бурения. Устойчивые и труднообрушаемые породы кровли характеризуются устойчивостью стенок скважин и весьма малым изменением их фактического диаметра по сравнению с номинальным.

При разработке геолого-геофизического метода прогнозирования устойчивости горных пород на стадии разведки угольных месторождений в Южно-Якутском бассейне из-за отсутствия опыта эксплуатации угольных месторождений подземным способом за основу была принята геолого-геофизическая классификация по устойчивости непосредственных и обрушаемости основных кровель [1]. Метод разрабатывался на материалах по пласту Д₁₉ Локучакинского участка, где по достаточно густой сети выполнены акустические исследования, позволяющие с требуемой точностью охарактеризовать физико-механические свойства углевмещающих пород. Эти данные легли в основу построения прочностных карт по основной и непосредственной кровлям. Так как на площади Локучакинского участка отсутствуют породы, которые могли бы пучиться под целевым пластом, а так же породы, которые могут непредсказуемо уплотняться, то почва пласта не рассматривалась.

Для участка разработана геолого-геофизическая типизация пород кровель [4], которая содержит данные о мощности слоев, о пределах прочности на сжатие, о геофизических параметрах пород: электрическое сопротивление, скорость распространения продольных волн. В качестве основных параметров при определении типов пород были приняты прочностные характеристики, поскольку значения скорости распространения упругих волн, приведенного диаметра, естественной радиоактивности горных пород автоматически учитывались при определении физико-механических свойств пород. Для прогнозирования устойчивости и обрушаемости

пород кровель угольного пласта Д₁₉ Локучакинского участка построены литолого-прочностные разрезы, охватывающие интервалы десятикратной мощности угольного пласта. На основании литолого-прочностных разрезов производится прогноз устойчивости и обрушаемости пород кровли угольного пласта, построены карты прочности непосредственной и основной кровель и результирующая прогнозная карта устойчивости пород непосредственной и обрушаемости пород основной кровли [4].

Разработка и внедрение в практику геолого-разведочных работ на угольных месторождениях рассмотренных методик и технологий позволяют поднять на качественно новый уровень оценку показателей качества углей, физико-механических свойств вмещающих пород и прогноз устойчивости боковых пород в горных выработках.

Литература

1. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций. – М.: Недра, 1990. – 472 с.
2. Гриб Н.Н. Разработка методов прогнозирования технологических характеристик углей, литологического состава и физико-механических свойств углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна по геофизическим данным: Автореф. ... дис. д. т. н. – Кемерово, 1999. – 49 с.
3. Гриб Н.Н. Опыт применения каротажа магнитной восприимчивости при изучении угленосных отложений Южно-Якутского каменноугольного бассейна // Тезисы докладов Международной геофизической конференции «Санкт-Петербург-95». – Т II. – С. 73–74.
4. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. – Новосибирск: Наука, 1999. – 240 с.
5. Гриб Н.Н., Самохин А.В., Черников А.Г. Методические основы системного исследования массива горных пород. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. – 104 с.
6. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Влияние изменений состава минеральных примесей в углях на их геофизические параметры (Южно-Якутский бассейн) // Известия вузов. Геология и разведка. – 1999. – № 5. – С. 140–142.

Поступила в редакцию 20.08.2015

Пространственное распределение эпицентров землетрясений северо-восточного сегмента Амурской микроплиты в различных фазах вращения Земли

С.В. Трофименко*, В.Г. Быков*, И.И. Колодезников**

**Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск*

***Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск*

Представлены результаты моделирования пространственного распределения эпицентров землетрясений в различных интервалах магнитуд северо-восточного сегмента Амурской микроплиты в пределах от 120° в.д. до 140° в.д. Установлена динамика сейсмичности в различных фазах изменения скорости вращения Земли. Предложено группировать сейсмические события по времени их возникновения в двух фазах изменения скорости вращения Земли «торможения–ускорения». Показано, что землетрясения в интервале магнитуд от $M=5$ до $M=6$, объединенные по фазам сейсмической активности в годовых циклах, группируются в кластеры, которые закономерно чередуются в пространстве в среднем через 3,5–4°. Для землетрясений в интервале магнитуд от $M=2$ до $M=4$ выделено три сейсмолинеамента, пространственно объединяющие системы разломов Станового структурного шва и системы разломов Тан-Лу различной кинематики и азимутов простирания. Сделано предположение о коллективной активизации разломов на фоне случайного процесса проявления сейсмичности.

Ключевые слова: скорость вращения Земли, фазы активизации сейсмичности, пространственная модель сейсмических кластеров, сейсмолинеament, Амурская микроплита.

Spatial Distribution of Earthquake Epicenters of Northeastern Segment of Amur Microplate in Different Phases of the Earth's Rotation

S.V. Trofimenko*, V.G. Bykov*, I.I. Kolodeznikov**

**Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk*

***Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk*

The results of modeling of spatial distribution of earthquakes in northeastern segment of the Amur microplate in various magnitude intervals in the range of 120°E to 140°E are presented. The seismicity dynamics in the different phases of change of the Earth's rotation speed is established. It is suggested to group the seismic events on the time of their occurrence in two phases of change of speed of the Earth rotation of «deceleration-acceleration». It is shown that the earthquake within the magnitudes interval from $M=5$ to $M=6$, united by phases of seismic activity in the annual cycle, are grouped into clusters, which regularly alternate in the space of an average of (3.5–40). For the earthquakes in the magnitude range from $M=2$ to $M=4$ three lineaments are distinguished which spatially combine fault systems of the Stanovoy Ridge and the Tan-Lu fracture zones of different kinematics and azimuths stretch. A supposition is made about the collective fault activation on a background of random seismicity process.

Key words: Earth's rotation speed, seismicity activation phases, spatial model of seismic clusters, seismo-lineament, Amur microplate.

*ТРОФИМЕНКО Сергей Владимирович – д.г.-м.н., в.н.с., trofimenko_sergei@mail.ru; *БЫКОВ Виктор Геннадьевич – д.ф.-м.н., зав. лаб., bykov@itig.as.khb.ru; **КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., проф., президент, anrsya@mail.ru.

Введение

Исследования по различным сейсмоактивным регионам показывают, что землетрясения, которые происходят в пределах континентальных границ микроплит и которые в современной терминологии формируют внутриплитные сейсмические зоны, требуют значительно более сложного моделирования, чем на границах глобальных плит литосферы, и являются результатом взаимодействия между всеми структурными элементами сейсмоактивного региона.

При изучении сейсмичности вдоль северной границы Амурской микроплиты от 120 меридиана до долготы 139° в.д. и от 44° с.ш. до 60° с.ш. установлено группирование эпицентров землетрясений вдоль тектонических структур различного генезиса в разные периоды в течение годового цикла.

Это может свидетельствовать о том, традиционные представления о сейсмогенерирующих структурах, контролирующих сейсмический процесс, в соответствии с упругой теорией отдачи, могут применяться только на ограниченных интервалах времени. В рамках открытых диссипативных систем разломы образуют сложные структуры, динамика которых не может быть объяснена с учетом поведения каждого отдельного разлома.

Новые концептуальные модели для описания межплитовых (межплитных) землетрясений базируются на представлениях, которые обосновывают пространственную конфигурацию и динамику континентальной сейсмичности коллективным поведением систем разломов.

Несмотря на наличие многочисленных исследований и различных подходов к моделированию континентальной сейсмичности, вопросы геолого-геофизического обоснования, физических и математических моделей их описания до настоящего времени носят не просто дискуссионный, но зачастую, противоречивый характер.

В пределах зон взаимодействия Евразийской литосферной плиты с Амурской микроплитой по результатам сейсмологического анализа выделяются сейсмические зоны, сформированные внутриконтинентальными землетрясениями с залеганием гипоцентров в пределах от 5 до 40 км.

Область исследования охватывает сегменты северной, северо-восточной и восточной границ Амурской микроплиты, западным ограничением которой выбрано Темулякит-Джелтулакское сгущение эпицентров землетрясений субдолготного простирания, контролируемой Темулякитскими (Олекминскими)

ми) системами разломов [1]. Северная граница трассируется полосой эпицентров землетрясений субширотного простирания от области меридиональных Темулякитских (Олекминских) разломов до Удской губы Охотского моря [2]. Центральная область сформирована динамическим взаимодействием кристаллических комплексов Алданского щита Сибирской платформы и Становой складчатой системы, где по данным инструментальных наблюдений выделена Олекмо-Становая сейсмическая зона в пределах 56–58° с.ш. и 120–139° в.д. Параллельно данной сейсмической зоне в полосе 54–56° с.ш. по сейсмологическим данным авторами [3, 4] выделяется отдельная Тукурингра-Джагдинская сейсмическая зона (рис. 1).

Моделированием сезонных смещений блока земной коры в годовых циклах установлено [6],

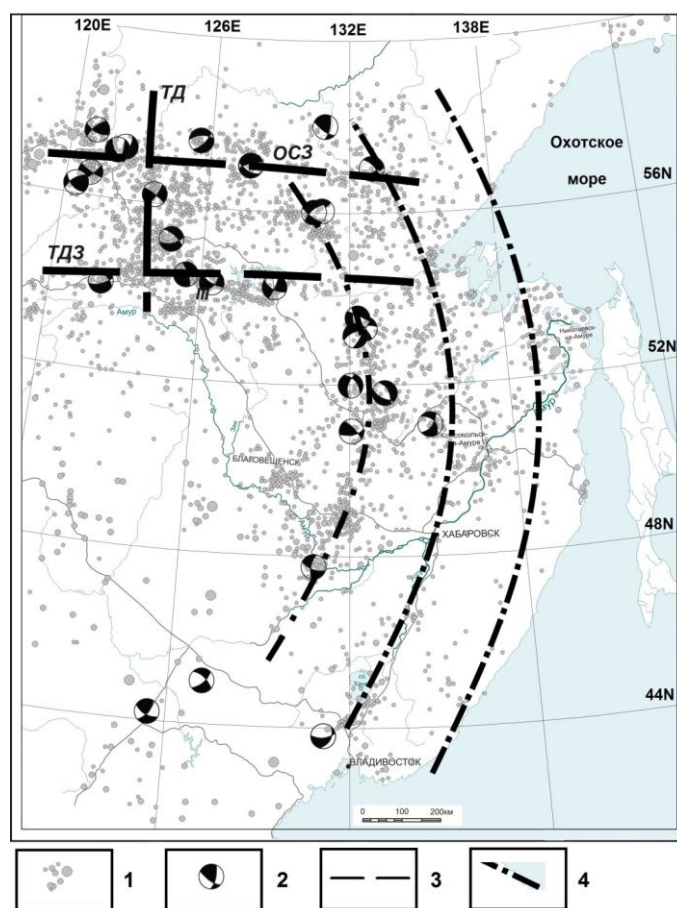


Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений северо-восточного сегмента Амурской коровой плиты. Карта выполнена на основе материалов [5]: 1 – эпицентры землетрясений с магнитудой от $M=2$ до $M=4$; 2 – фокальные механизмы отдельных землетрясений; 3 – примерные осевые линии: ОСЗ – Олекмо-Становая сейсмическая зона, ТДЗ – Тукурингра-Джагдинской сейсмической зоны, ТД – Темулякит-Джелтулакского сгущения эпицентров; 4 – сейсмолинементы зон повышенной плотности очагов землетрясений

что скорость изменения модуля горизонтального смещения блока идентична изменению скорости вращения Земли в течение года, максимальна в январе и июле и минимальна в марте и сентябре. В этой связи была поставлена цель о возможном влиянии скорости вращения Земли на сейсмический режим.

Результаты моделирования сейсмического режима

Для проверки возможной зависимости сейсмической активности от фазы изменения скорости вращения Земли был произведен расчет числа землетрясений с магнитудами от $M=2$ до $M=4$ при группировании событий на спадах, увеличении, минимумах и максимумах скорости. Расчет количества землетрясений по трехмесячным периодам в различных фазах движения показал, что максимум сейсмической активности проявляется в зимне-летний период, минимум – в весенне-осенний (рис.2), т.е. сейсмичность увеличивается при уменьшении скорости.

Данные результаты моделирования послужили основанием для группирования землетрясений по фазовому признаку, т.е. землетрясения в интервалах магнитуд от $M=2$ до $M=4$ и $M=5$ до $M=6$ объединяются в две группы по фазам максимумов и минимумов сейсмической активности.

На рис.3 представлено пространственное распределение эпицентров землетрясений с магнитудами от $M=5$ до $M=6$. Землетрясения сгруп-

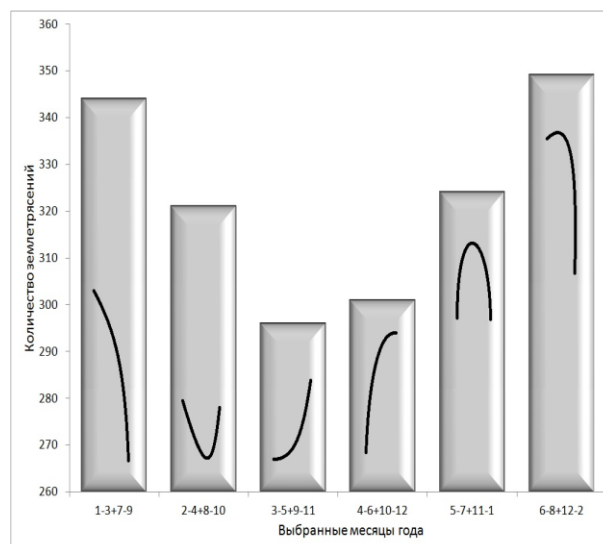


Рис. 2. Распределение количества землетрясений по фазам изменения модуля скорости горизонтального смещения блока.

Цифры горизонтальной оси диаграммы – цифровой идентификатор месяца года; кривые на диаграмме – примерный график изменения скорости вращения Земли

пированы по периодам из 6 месяцев: «январь, февраль, март+июль, август, сентябрь» (темные кружки) и «апрель, май, июнь+октябрь, ноябрь, декабрь» (светлые кружки). Зоны с группами землетрясений с одинаковой фазой изменения скорости разделены субмеридиональными прямыми.

Обсуждение результатов и выводы

Первыми результатами по изучению статистических распределений количества землетрясений в годовых циклах было установлено, что для зоны взаимодействия Амурской микроплиты и Евразийской литосферной плиты распределение количества землетрясений, сгруппированных по фазам изменения скорости вращения Земли, отличается от равномерного распределения (рис.1).

Максимумы статистических кривых относятся к периодам уменьшения скорости движения блока. В эти периоды происходит разворот вектора горизонтального движения [6]. Это может означать, что блоки земной коры находятся в состоянии наибольшего кинематического взаимодействия, что и приводит к уве-

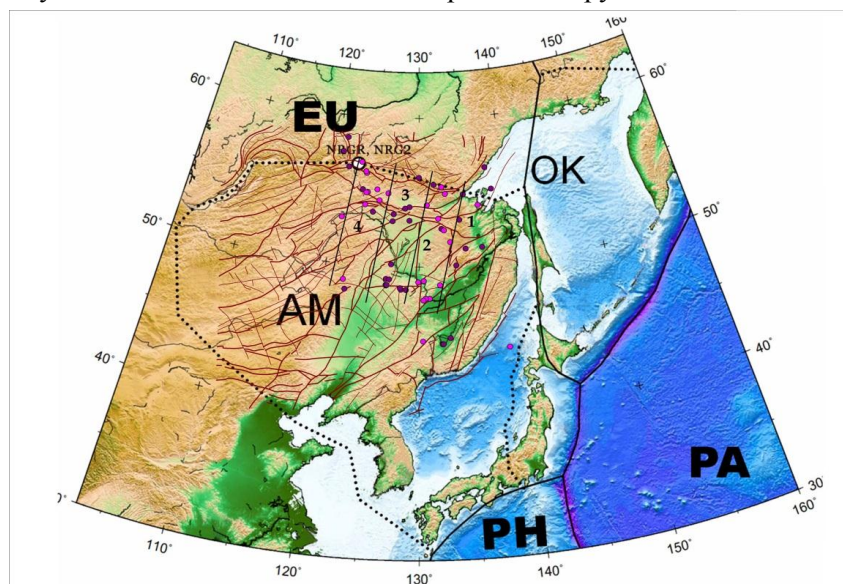


Рис. 3. Группирование эпицентров землетрясений вдоль северо-восточного сегмента Амурской коровой плиты:

1–4 – области группирования землетрясений в фазах «сжатия–расширения» земной коры. Вынесены основные известные разломы различной кинематики из системы Станового структурного шва и системы Тан-Лу

личению количества слабых землетрясений, в нашем случае с магнитудами от $M=2$ до $M=4$ (рис.2).

Иными словами, движение блока, вызванное изменением скорости вращения Земли, в ансамбле блоков приводит к изменению или перераспределению энергии упругих деформаций и, как следствие, к изменению в сейсмическом процессе.

Пространственное распределение и группирование эпицентров землетрясений с магнитудами от $M=5$ до $M=6$ по фазам изменения скорости вращения Земли позволяют сделать предположение, что землетрясения формируются в различных геодинамических условиях. То есть в фазе «ускорения» инициируется сейсмический процесс в области преобладающего горизонтального сжатия земной коры, а в фазе «торможения» – в области растяжения земной коры. Незначительное преобладание землетрясений в зимне-летний период может быть следствием того, что форма деформационной волны возмущения не симметрична.

Основанием для данного предположения служит тот факт, что форма траектории движения блока земной коры в виде бризера имеет остроконечный максимум и растянутый минимум, т.е. июльский разворот вектора горизонтального движения происходит быстрее, чем январский. В нашей модели это означает, что триггерный эффект от изменения скорости вращения Земли более значим в области сжатия земной коры, по крайней мере для исследуемой области внутриконтинентальных землетрясений северо-восточного сегмента Амурской микроплиты.

Выделенные сейсмические кластеры объединяют системы разломов различной кинематики. Данный результат коррелирует с развиваемыми теоретическими моделями, в рамках которых внутриконтинентальная сейсмичность ассоциируется с коллективной активизацией систем разломов.

Математическое моделирование и геометрические построения позволили сделать вывод о том, что сейсмический процесс, отражающий поле современных внутриконтинентальных эпицентров землетрясений, на фоне случайного распределения отдельно взятого землетрясения в пространстве и времени формируется под воздействием внешних периодических силовых полей и отражает коллективное поведение механически связанных систем разломов в виде одновременной активизации кластеров в интервале магнитуд от $M=5$ до $M=6$. Это послужило основанием для принятия рабочей гипотезы о взаимозависимой активизации разнородных

структурных элементов земной коры под воздействием периодических изменений скорости вращения Земли в течение года.

Установлено, что на восточном сегменте в интервале магнитуд от $M=2$ до $M=4$ области увеличенной плотности эпицентров землетрясений образуют пространственные циклы, объединяющие эпицентрально-полюс Олекмо-Становой, Тукурингра-Джагдинской и Тан-Лу сейсмических зон, и цепочки сейсмолинеamentов (рис.1).

Все землетрясения, образующие данные протяженные зоны, пространственно не связаны с отдельными тектоническими нарушениями. Пространственно их можно представить в виде сейсмолинеamentов, пересекающих разломы различного генезиса и азимутов простирания и объединяющих широтные сейсмические зоны, трассируемые вдоль Станового структурного шва и обрамляющих его разломов и зоны разломов Тан-Лу северо-восточного простирания.

Работа выполнена в рамках проекта «Волновые геодинамические процессы в зонах коллизии и скольжения литосферных плит» по программе фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (грант ДВО РАН 15-I-2-014) при частичной финансовой поддержке государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки России.

Литература

1. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marakhanov A.V. et al. Seismotectonics of the Transitional Region from the Baikal Rift Zone to Orogenic Rise of the Stanovoi Range // *Geotectonics*. – 2010. – Vol. 44, No. 1. – P. 25–44, doi: 10.1134/S0016852110010036.
2. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marakhanov A.V. et al. Source Zones of Strong Earthquakes in Southern Yakutia as Inferred from Paleoseismogeological data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2009. – Vol. 45, No. 2. – P. 101–117, doi:10.1134/S1069351309020025.
3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. и др. Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // *Тихоокеанская геология*. – 2008. – Т. 22, № 6. – С. 55–61.
4. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // *Тихоокеанская геология*. – 2012. – Т. 31, № 1. – С. 5–17.
5. Кузнецов В.Е. Глубинное строение и современная геодинамика Приамурья // *Тихоокеанская геология*. – 1998. – Т. 17, № 2. – С. 61–67.
6. Trofimenko S.V., Bykov V.G. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2014. – Vol. 8, No 4. – P. 247–255, doi: 10.1134/S1819714014040071.

Поступила в редакцию 28.09.2015

Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН

А.А. Галанин, А.П. Дьячковский, В.М. Лыткин,
М.П. Бурнашева, Г.И. Шапошников, А.А. Куть

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

В 2011 г. в Институте мерзлотоведения СО РАН была создана лаборатория углеродного датирования, в основу работы которой положен классический метод жидкостно-сцинтилляционного анализа с использованием спектрометра-радиометра Quantulus 1220. В 2014 г. в радиоуглеродной лаборатории начато создание электронной базы радиоуглеродных стандартов и датировок, в которой указываются авторы (владельцы) образцов, точные координаты места отбора. В настоящей статье представлен перечень 32 датировок, выполненных в 2014 г. Дается краткая характеристика отдельных уникальных датировок и объектов, играющих важную роль для понимания позднеледстоценовой и голоценовой истории природы Якутии.

Ключевые слова: радиоуглеродный анализ, абсолютный возраст, эоловые образования Якутии, туколаны, плейстоценовые оледенения, бореальный период голоцена, абсолютный возраст мамонтов.

The Results of Definition of Absolute Age of Samples in Radio-Carbon Laboratory of Permafrost Research Institute of the Siberian Branch of the RAS

A.A. Galanin, A.P. Dyachkovsky, V.M. Lytkin, M.P. Burnasheva, G.I. Shaposhnikov, A.A. Kut

Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

The paper represents main stages of the development of Laboratory of carbon dating established in the Permafrost Institute SB RAS, which work is based on the classical method of liquid scintillation analysis using a spectrometer-radiometer Quantulus 1220. In 2014 Radiocarbon Laboratory initiated creation of an electronic database of radiocarbon dating standards, in which the authors (collectors) of the samples are named, as well as the precise coordinates of the sampling. This article presents a list of 32 dates performed in 2014. A brief description of the individual and unique dates and sections that play an important role for the understanding of Late Pleistocene and Holocene natural history of Yakutia.

Key words: radiocarbon analysis, absolute age, aeolian formations of Yakutia, tukulans, pleistocene freezing, Boreal Holocene, absolute age of mammoths.

Введение

Многолетнемерзлые отложения различных генетических типов в целом являются естественной природной летописью развития при-

родной среды четвертичного периода благодаря хорошей сохранности органических остатков – костей животных, древесины, торфа, гумуса и др. В этом плане Якутия является уникальным объектом для изучения палеогеографических событий прошлого. Радиоуглеродный метод абсолютного датирования предоставляет возможность определения возраста палеогеографических событий последних 40–50 тыс. лет.

В 2011 г. в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН была организована радиоуглеродная лаборатория (РЛ), основанная на базе нового комплекта современного оборудования – ультранизкофонового жидкостно-сцинтилляционного спектрометра-радиометра Quantulus 1220 (производство США) и химиче-

ГАЛАНИН Алексей Александрович – д.г.н., г.н.с., agalanin@gmail.com; ДЯЧКОВСКИЙ Алексей Петрович – м.н.с., d_alex81@mail.ru; ЛЫТКИН Василий Михайлович – инженер-исследователь, аспирант gidro1967@mail.ru; БУРНАШЕВА Марианна Павловна – вед. инженер, burnmar@mail.ru; ШАПОШНИКОВ Григорий Иванович – инженер-исследователь, gregory_shaposhnikov@list.ru; КУТЬ Анна Алексеевна – инженер-исследователь, ankaurban@mail.ru.

ской установки для синтеза бензола (производство Института геохимии окружающей среды Украины).

В 2013 г. была освоена инновационная технология получения бензола путем прямого синтеза методом вакуумного пиролиза, минуя стадию предварительного обугливания (древесина, торф) или извлечения коллагена (кость). Данная методика позволила существенно увеличить количество извлекаемого углерода и снизить минимальный вес исходных образцов. В целом это существенно расширяет возможности применения жидкостно-сцинтилляционного радиоуглеродного метода для датирования самых разнообразных объектов криолитозоны, содержащих даже небольшие объемы органического материала в рассеянной форме, например, гумусированные супеси, суглинки с рассеянной тонкодисперсной органикой и др.

В настоящее время РЛ ИМЗ СО РАН имеет возможность выполнять радиоуглеродное датирование образцов следующего веса: кость – 100–200 г; древесина – 12–20 г в пересчете на чистый углерод; торф – 30–50 г; древесный уголь – 5–10 г. В отдельных случаях датировка может быть выполнена по нескольким граммам (2–3) углей.

Создание геоинформационной базы радиоуглеродных датировок

По мере выполнения датировок в РЛ ИМЗ СО РАН ведется создание геоинформационной базы данных абсолютных возрастов различных объектов и отложений (таблица). Каждая датировка имеет точную географическую привязку к местности и соответствующим разрезам. В реестре указываются коллектор и владелец каждого датированного образца. Для удобства хранения и использования базы данных каждой датировке присваивается идентификационный номер, начинающийся с аббревиатуры MPI (MelnikovPermafrostInstitute). По данному номеру пользователь в случае необходимости может легко отыскать все исходные протоколы и дату выполнения анализа, вес полученного бензола, параметры счета, результаты определения активности. Это даёт возможность выполнения вторичных перерасчётов в случае необходимости.

Понимая важность абсолютных датировок в изучении различных фундаментальных вопросов палеогеографии, геокриологии, четвертичной геологии и археологии региона, для удобства пользования и обмена данными между научными специалистами ЯНЦ СО РАН и СВФУ мы задались целью периодически публиковать полученные результаты при минималь-

ном объёме их интерпретации в периодических изданиях РС(Я). Последнее обусловлено этическими соображениями по отношению к коллекторам и владельцам датированных образцов, за которыми остаётся право публикации датировок с соответствующим контекстом и интерпретацией по собственному усмотрению. Данная практика публикации в периодических изданиях перечня новых датировок радиоуглеродных лабораторий с минимальной их интерпретацией широко использовалась ранее в отечественной науке [1].

В 2014 г. в РЛ ИМЗ СО РАН выполнено около 50 синтезов бензола и 32 датировки (см. таблицу), кроме того осуществлены перерасчёт и корректировка всех предыдущих датировок (29 шт.), выполненных за период с 2011 по 2013 г. Корректировка и уточнение предыдущих датировок стали возможными в результате создания в 2014 г. электронной базы эталонов различного веса и гашения, выполнения технологических разработок по построению кривой гашения. Ниже кратко охарактеризованы наиболее интересные объекты датировок 2014 г.

Изучение возраста Малоляховского мамонта

В феврале–мае выполнялись работы по оценке возраста бедренной и реберной костей самки мамонта уникальной сохранности, найденной в 2013 г. в ледяной жиле на острове Мал. Ляховский. Исследования данного феномена выполняются РЛ ИМЗ СО РАН в рамках Международного проекта по комплексному изучению Малоляховского мамонта. На основании двух фрагментов кости было получено 2 датировки.

Первая, выполненная с использованием микровиалы объемом 1,5 мл, дала оценку $14C = 29,3 \pm 1,0$ тыс. л.н. (MPI-31), что соответствует календарному интервалу 35,5–31,3 тыс. л.н. Вторая датировка, полученная из ребра с использованием виалы объемом 2,5 мл, дала оценку $14C = 25,6 \pm 0,5$ тыс. л.н. (MPI-32), что соответствует календарному интервалу 30,9–28,7 тыс. л.н. Выполненные профессором Х.Плихт (Hans van der Plicht, Нидерланды) 2 параллельные масс-спектрометрические датировки (GrA-60044, GrA-60021, $14C = 28,61 \pm 0,11$ тыс. л.н., календарный интервал 32,93–32,48 тыс. л.н.) показали высокую сходимость результатов датирования разными методами. Таким образом, возможность дублирования отдельных датировок в разных лабораториях позволила установить дополнительный источник возможных ошибок использования виал разного объема и скорректировать дальнейшие опытно-методические работы в данном направлении в РЛ ИМЗ СО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ОБРАЗЦОВ

Вместе с Малоляховским мамонтом была осуществлена датировка аналогичного объекта – Анабарского мамонта, обнаруженного в идентичных геохронологических условиях в ледово-лессовых отложениях 1 надпойменной террасы безымянного водотока в восточной части Анабарской антеклизы. Углеродный возраст Анабарского мамонта $14C = 28,9 \pm 0,5$ тыс. л.н. (MPI-30) и календарный (34,0–31,6 тыс. л.н.) оказались практически синхронными таковым Малоляховского мамонта.

Полученные датировки имеют значение не только для понимания позднеплейстоценовой хронологии мамонтового биома, но и уникальны для общего понимания закономерностей эволюции криолитозоны и палеогеографических реконструкций Арктики. Так, активно дискутируемая в литературе концепция о наличии позднеплейстоценового ледникового покрова на арктическом шельфе Якутии полностью опровергается датировками Малоляховского мамонта, найденного в составе ледового комплекса о. Мал. Ляховский. Наоборот, широкое распространение покровной ледово-лессовой формации и наличие в ней остатков мамонтового биома свидетельствуют об отсутствии здесь позднеплейстоценового оледенения, по крайней мере, на границе каргинского и сартанского термохронов.

Оценка положения ледников и границы леса в позднем плейстоцене и голоцене по погребенным пневым горизонтам

Важным результатом работы РЛ ИМЗ СО РАН в 2014 г. стало обнаружение и оценка абсолютного возраста горизонтов лиственничных пней, погребенных под ледниковыми и криогенно-склоновыми отложениями. В исследованном обнажении Бургали 1, находящемся в осевой (тальвеговой) части реконструируемого крупного горно-долинного ледника на глубине 20 м от поверхности, установлена доледниковая песчано-галечная терраса, в верхней части которой обнаружено множество пней лиственниц и их корневых систем в естественном (вертикальном) залегании. Специфические раздавленные в одном направлении и на одинаковом уровне макушки пней свидетельствуют о том, что деревья были срезаны (сломаны) наступающим ледником, будучи еще в живом состоянии. Исследованный разрез расположен выше современной верхней границы леса на 200 м по вертикали и примерно в 10 км по латерали. Радиоуглеродный возраст пней составляет $14C = 45,8 \pm 2,3$ тыс. л.н. (MPI-46) и близок к предельному для данного метода (таблица).

Другое местоположение горизонта пней лиственницы установлено в среднегорном обра-

Радиоуглеродные датировки, полученные РЛ ИМЗ СО РАН в 2014 г.

Лабораторный номер	Регион, собственник образца	Координаты, широта, долгота	Вмещающие отложения	Глубина от поверхности (террасы), м	Материал пробы	Возраст $14C$, л.н.	Календарный возраст, л.н., ($P > 94,9\%$)
1	2	3	4	5	6	7	8
MPI-30	Анабарский щит, С.Е. Григорьев, Музей мамонта СВФУ		Полигонально-жильные льды в лессовидных суглинках на поверхности 1 надпойменной террасы высотой 8–10 м	4–5	Кость мамонта	28900 ± 500	34000–31600
MPI-31	Остров Мал.Ляховский, С.Е. Григорьев, Музей мамонта СВФУ	74°04'11" 140°24'02"	Полигонально-жильные льды в лессовидных покровных суглинках	1	Бедренная кость мамонта	29300 ± 1000	35500–31300
MPI-32					Реберная кость мамонта	25600 ± 500	30900–28700
MPI-33	Нижнее течение р. Виллой, А.А.Галанин, Б.А.Павлов, ИМЗ СО РАН	63°56'54" 122°52'47"	Верхняя часть террасы 65–70 м. Основание пачки покровных лессовидных суглинков с ПЖЛ, перекрывающих пачку перекрестно-слоистых эоловых песков и супесей	3–4	Мелкие обломки древесины	22000 ± 300	27100–25700
MPI-34		63°54'57" 122°52'47"	Средняя часть террасы 65–70 м. Русловой и пойменный аллювий	55	То же	53500 ± 8000	>47000
MPI-35	Нижнее течение р. Виллой, Кысыл-Сырский тукулан, А.А.Галанин,	63°54'57" 123,2337	Современные незакрепленные дюнные пески с погребенными деревьями	0,8	Древесина хорошей сохранности	325 ± 65	510–155
MPI-36	А.П. Дьячковский, Г.И.Шапошников, ИМЗ СО РАН	63°54'58" 123°13'59"	Нижняя часть 1 террасы. Подстилающий тукулан аллювиальные супеси, пески и тонкослоистые суглинки с клиновидными песчаными жилами	40	Тонкослоистый сизый суглинок с рассеянным растительным детритом	39900 ± 2000	49000–41000
MPI-37		63°54'10" 123°12'40"		35		28400 ± 600	33800–31200
MPI-38		63°54'58" 123°12'40"		40		43500 ± 1700	> 44700

1	2	3	4	5	6	7	8
MPI-39	Нижнее течение р. Енисей, О.А.Казанский, ИГЛ ИМЗ СО РАН, г. Игарка	69°18'37" 88°35'06"	Стартанские озерно- ледниковые глины, льdistые, перекрыты	5	Древесина слабо разложившаяся	2600 ±95	2880– 2360
MPI-40			суспесчано-суглинистым аллювием с мощными линзами торфа, с древес- ными включениями	5	Торф светло- коричневый, слабо разло- жившийся	2140 ±50	2310– 1995
MPI-41	Хр. Сунтар-Хаята, верховье р. Бургали, В.М. Лыткин, ИМЗ СО РАН	62°46'05" 140°54'12"	Позднеголоценовые кол- лювиально-криогенные отложения	1,5	Древесина лиственницы	4850 ±90	5860– 5320
MPI-42	Нижнее течение р. Виллой, Кысыл-Сырский туку- лан, А.А. Галанин, А.П. Дьячковский, Г.И. Шапошни- ков, ИМЗ СО РАН	63°54'10" 123°12'40"	Торфяник мощностью 1,8 м, подстилающий современные перекрестно-слоистые пески (дюны)	1,7–1,8	Торф с гумусом	8140 ±135	9440– 8640
MPI-43				0,1–0,2	Торф слабо разложившийся	3330 ±100	3830– 3360
MPI-44	Центральная Якутия, Усть- Алданский район, Ю.И. Григорьев, А.Ф. Хорошев (Андрей И) РОФ «Русский север»	62°34'36" 129°59'22"	Поверхность бестяхской террасы. Средневековое захоронение	2	Кости человека (ребра, позво- ночник)	420 ±105	655–150
MPI-45				2	Деревянная колода (гроб)	320 ±65	510–150
MPI-46	Хр. Сунтар-Хаята, верховье р. Бургали, В.М. Лыткин, ИМЗ СО РАН	62°54'10" 140°59'49"	Позднеплейстоценовая донная морена	20	Древесина хо- рошей сохран- ности	45800 ±2300	> 45900
MPI-47	Нижнее течение р. Виллой, Кысыл-Сырский тукулан, А.А.Галанин, А.П. Дьячковский, Г.И.Шапошников, ИМЗ СО РАН	63°55'10" 123°16'04"	Котловина выдувания, погребенный почвенный горизонт со следами пожара	0	Угли	4400 ±85	5290– 4840
MPI-48		63°54'10" 123°12'40"	Торфяник мощностью 1,8 м, подстилающий со- временные перекрестно- слоистые пески (дюны)	1,2–1,3	Торф слабо разложившийся	3990 ±90	4815– 4155
MPI-49				0,5–0,6	То же	3540 ±95	4090– 3590
MPI-50		63°54'57" 123°13'59"	Современные незакреп- ленные дюнные пески с погребенными деревьями	0,5	Песок с детритом	Совре- менный	
MPI-51		63°54'10" 123°12'40"	Торфяник мощностью 1,8 м, подстилающий со- временные перекрестно- слоистые пески (дюны)	0,8–0,9	Торф слабо разложившийся	3800 ± 75	4415– 3980
MPI-52				1,3–1,4	Торф с гумусом	5840 ±100	6890– 6410
MPI-53				1,0–1,1	Торф слабо разложившийся	3830 ±90	4515– 3975
MPI-54	Хр. Сунтар-Хаята, верховье р. Бургали, В.М. Лыткин, ИМЗ СО РАН	62°45'13" 140°59'49"	Флювиогляциальные отложения	1,0	Торф с гумусом	880 ±75	930–680
MPI-55	Остров Котельный Новосибирский архипелаг, А.В. Протопов, АН РС (Я)	75°21'32" 139°15'05"	Деградирующий полиго- нально-жилиный ком- плекс (едома), торфяной бугор (байджарах)	0	Древесина хо- рошей сохранности	40200 ±2400	49600– 41400
MPI-56	Нижнее течение р. Виллой, Кысыл-Сырский тукулан. А.А. Галанин, А.П. Дьячковский, Г.И. Шапошников, ИМЗ СО РАН	63°55'10" 123°14'17"	Котловина выдувания	0–0,3	Древесина разложившаяся	280 ± 65	500–140
MPI-57		63°55'10" 123°16'04"	Торфяник мощностью 1,8 м, подстилающий со- временные перекрестно- слоистые пески (дюны)	1,6–1,7	Торф с гумусом	8250 ±100	9470– 9010
MPI-58	г. Якутск, Покровский тракт 10 км, Р.И. Бравина, ИГИИПМНС СО РАН		Элювий, делювий, озер- ные осадки и т.д., терра- са старичного озера Ат- ласовское, супесь	0,6–0,7	Кости человека	320 ± 120	550–0
MPI-59	г. Якутск, Покровский тракт 10 км, Р.И. Бравина, ИГИИПМНС СО РАН		То же	0,6–0,7	Трухлявое де- ревянная коло- да (гроб)	270 ± 80	510–0
MPI-60	Нижнее течение р. Виллой, Кысыл-Сырский тукулан, А.А.Галанин, А.П. Дьячковский, И.И. Христофоров, ИМЗ СО РАН	63°55'10" 123°14'17"	Современные незакреп- ленные дюнные пески с погребенными деревьями	1,4–1,6	Разложившееся дерево	600 ± 75	675–510
MPI-61	Центральная Якутия, с. Улаах- Аан, местность Найрамдал, Р.И. Бравина, ИГИИПМНС СО РАН		Элювий, делювий, озер- ные осадки и т.д., терра- са пересохшего старич- ного озера, песок	0,4–0,5	Кости человека	245 ± 135	500–0

млении массива г. Мус-Хая (хр. Сунтар-Хаята). Исследованный разрез Каменка-1 расположен на абс. отметке 1712 м, что на 300 м выше современной границы леса в данном районе по вертикали и на 8 км по латерали. Субповерхностный пнёвый горизонт частично погребен маломощными криогенно-склоновыми отложениями (солифлюкционно-десерпционные щебнистые суглинки). Полученная датировка дает интервал 5860–5320 календарных лет (МРІ-41) и указывает на более теплые условия конца бореального оптимума голоцена, предшествовавшего последнему (современному) оледенению.

Определение возраста и истории формирования тукуланов в бассейне нижнего течения р. Вилюй

Еще одним важным достижением в понимании хронологии и эволюции криолитозоны Центральной Якутии стало детальное изучение разрезов плейстоцен-голоценовых криогенно-эоловых образований в бассейне нижнего течения р. Вилюй. Тукуланы – специфические комплексы частично мерзлых песчаных дюн – являются одним из наименее изученных образований в плане палеогеокриологических реконструкций региона. В 2014 г. в ходе полевых работ было исследовано несколько наиболее репрезентативных разрезов дюнных комплексов. Выполнено 17 новых датировок (МРІ-33, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 60), позволивших установить хронологию и палеогеографические условия формирования данных отложений (таблица).

Изначально на основе публикаций предшественников считалось, что криогенно-эоловые образования Центральной Якутии формировались в конкретные и достаточно узкие хронологические интервалы, в частности генезис современных активно движущихся дюнных песков предполагался позднеголоценовым. Полагалось также, что образования ледового комплекса и тукуланы развивались в совершенно различные климатические эпохи. На основании полученных датировок и детального криофациального изучения разрезов нами было установлено, что на протяжении последних 3 морских изотопных стадий дюнообразование никогда окончательно не прекращалось и развивалось на протяжении всего позднелайстоценового интервала, причем максимальная активизация эоловых процес-

сов имела место в позднем плейстоцене. Активизация современного дюнообразования началась около 5 тыс. л.н. после окончания бореального оптимума. Кроме того, на основании анализа изученных разрезов установлен факт синхронного формирования массивов дюнных песков и отложений ледового комплекса. Таким образом, на основе радиоуглеродного анализа мы нашли убедительные доказательства, свидетельствующие об одновременности формирования и фациальном родстве дюнных комплексов и льдистых покровных суглинков (ледового комплекса), что указывает на их принадлежность к единой криогенно-эоловой формации позднего плейстоцена.

Датировки археологических находок

Еще одним из результатов работы РЛ ИМЗ СО РАН в 2014 г. стало выполнение датировок археологических образцов наиболее ранних средневековых поселений на территории Усть-Алданского района Центральной Якутии (МРІ-44, 45). Выполненные датировки костных человеческих останков и деревянной колоды (гроба), найденных археологами РОФ «Русский север», показали, что данное поселение относится к XV–XIX вв. (таблица).

Отобранные археологами Института гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера СО РАН образцы костных человеческих останков и деревянной колоды на территории г. Якутска и с. Улаах-Аан показали, что эти останки также относятся к XV–XX вв. (таблица).

Сотрудники радиоуглеродной лаборатории выражают благодарность сотрудникам ИМЗ СО РАН В.В.Куницкому, Н.А.Павловой, О.И.Тетерину за оказанную неоценимую материальную и техническую помощь при организации лаборатории.

Исследования выполнены при частичной поддержке исследовательских проектов РФФИ-РС(Я)-восток-а № 12-05-98507; № 15-45-05129 и РФФИ № 14-05-0043514.

Литература

1. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – М.: Наука, 1977. – № 47.

Поступила в редакцию 20.08.2015

Биологическая интерпретация микрофоссилий *Dzhelindia* и *Ulophyton* из верхнего рифея Сибири

Л.С. Софронеева, П.Н. Колосов

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

Кустистого типа строения, разветвленные, обызвествленные, породообразующие микрофоссилии рода Dzhelindia Kolosov, 1970, широко распространенные в верхнерифейских отложениях Сибири, и органикостенные микрофоссилии рода Ulophyton Timofeev et Germann, 1979, путём биологической их интерпретации включены в семейство Cambrinaceae Korde (порядок Cambrinales Korde, класс Ptothofloridomorphophyceae Korde, отдел Rhodophyta). В этом семействе по морфологии, расположению органов размножения и по принадлежности к экологической группе эпипелиты они сравниваются с кембрийского возраста родами Filaria Korde, 1973 и Razumovskia Vologdin, 1939.

Ключевые слова: Сибирь, верхний рифей, фоссилии, Rhodophyta, Ulophyton, Dzhelindia, кустистые слоевища.

Biological Interpretation of Microfossils Dzhelindia and Ulophyton from the Upper Riphean of the Siberia

L.S. Sofroneeva, P.N. Kolosov

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

Structures of bushy type, calcified, rock forming microfossil of Dzhelindia Kolosov 1970 genus, widely spread in the Upper Riphean deposits of Siberia, and organic-walled microfossil of Ulophyton Timofeev et German 1979 genus, according to their biologic interpretation are included into Cambrinaceae Korde family (Cambrinales Korde order, Ptothofloridomorphophyceae Korde class, Rhodophyta division). In this family they are compared with the Cambrian Filaria Korde, 1973 and Razumovskia Vologdin, 1939, genera, according to bushy structure of the thallus from uniserial branching, rising filaments with places of vegetative reproduction at different places of filaments and due to belonging to benthic algae ecologic group.

Key words: Siberia, Upper Riphean, fossil, Rhodophyta, Ulophyton, Dzhelindia, bushy thallus.

Нитевидные, кустистые, разветвленные, обызвествленные, нередко породообразующие, от микроскопических до макроскопических размеров микрофоссилии рода *Dzhelindia* Kolosov, 1970 (рис.1) широко распространены в органо-генных известняках и доломитах позднерифейского возраста. Они обнаружены в ченчинской свите Байкало-Патомской складчатой области [1], торгинской свите Березовской впадины [2], улаханбамской (кандыкской) свите Юдомо-Майского прогиба, юсмастакской свите Западного Прианабарья севера Сибирской платформы [2,3], нижней части забитской свиты

района Боксонского месторождения Восточного Саяна [4], свите Tongying (поздний синий) Юго-Западного Китая [5]. Сохранившиеся в органи-

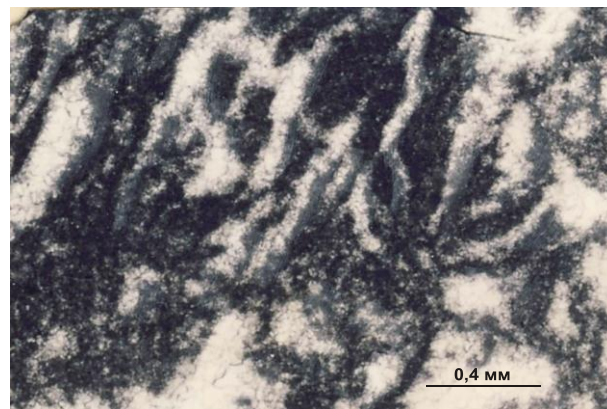


Рис.1. *Dzhelindia diversa* Kolosov, 1970

СОФРОНЕЕВА Лена Семеновна – м.н.с.,
sofroneeva_l@mail.ru; КОЛОСОВ Петр Николаевич
– д.г.-м.н., г.н.с. p_kolosov@diamond.ysn.ru.

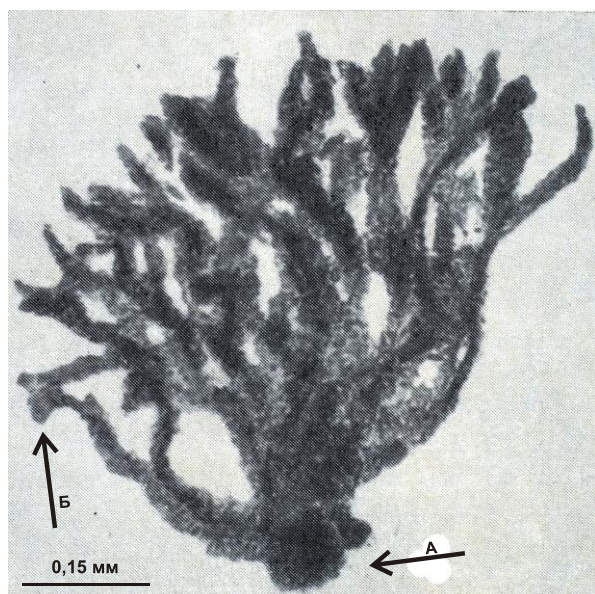


Рис.2. *Ulophyton rifeicum* Timofeev et Germann, 1979 [6, табл. XXVIII, фиг.1]: А – ризоид или базальная клетка; Б – предположительно орган размножения

костенном состоянии в темно-серых глинистых сланцах верхней части кумахинской свиты (возраст около 900 млн лет) лахандинской серии Учуро-Майского района (р. Мая, левый берег, в 25 км ниже пос. Аим) кустистые разветвленные микрофоссилии (рис.2) выделены в род *Ulophyton* Timofeev et Germann, 1979 [6]. Биологическая интерпретация и систематическое положение упомянутых микрофоссилий недостаточно разработаны. Этим вопросам и посвящена статья.

Род *Dzhelindia* Kolosov выделен по коллекции, собранной одним из авторов статьи в 1966 г. по р. Жуя (левый приток р. Чара, бассейн р. Олекмы) из органогенных светло-серых известняков ченчинской свиты верхнего рифея северо-восточной окраины Патомского нагорья [1]. Род был включен в отдел *Cyanophyta* (цианобактерии). В описании типового вида *Dzhelindia diversa* Kolosov, 1970 отмечалось, что это бентос, нити поднимаются от субстрата вверх, достигают длины 0,6–1,2 мм. Тельца, слагающие нити, расположены в один ряд. Кроме того, наблюдается большое число телец (клеток или колоний), сидящих сбоку нитей. Отмеченные в первичном описании тельца, слагающие нити, мы интерпретируем как клетки, а таковые, расположенные сбоку нитей, как места вегетативного размножения.

В 1975 г. [2] род *Dzhelindia* сравнивался не только с представителями современных *Cyanophyta*, но и с родом *Razumovskia* Vologdin. Последний распространен в кембрийских отложе-

ниях. Он был выделен в толщах Южного Урала [7]. В дальнейшем несколько видов рода *Razumovskia* обнаружено во многих районах Сибири [8,9]. Род включен в новое семейство *Cambrinaceae* Korde, 1973, порядка *Cambrinales* Korde, 1973, отдела *Rhodophyta* [8].

В 2008 г. *Dzhelindia* была охарактеризована [10] как принадлежащая к водорослям отдела *Rhodophyta*. При этом не было указано, к какому порядку и семейству следует её относить. Среди рецентных родофит *Dzhelindia* по морфологии сравнимы с *Audouinella* Bory [11]. Виды этих родов сравнимы по размерам (до 80 мкм) однорядных клеток, создающих ветвящиеся бентосные нити, расположению органов размножения пучками на боковых веточках. Род *Audouinella* входит в семейство *Acrochaetiaceae* (Hamel) Fritsch, порядка *Nemalionales* Schmitz, отдела *Rhodophyta*. Это семейство включает рода, которые в клетках содержат хлоропласты (хромотофоры) определенных формы и количества, с пиреноидами или без них. Этих основных таксономических признаков семейства не имеет род *Dzhelindia*. Поэтому он не может быть включен в указанное семейство и порядок *Nemalionales*.

Род *Dzhelindia* Kolosov близок к роду *Razumovskia* Vologdin по строению слоевища из скоплений нитей, отходящих кверху. По кустистому строению слоевища из однорядных ветвящихся, поднимающихся кверху нитей с местами вегетативного размножения на разных местах нитей, *Dzhelindia* вполне сравнимы с родом *Filaria* Korde, 1973 из нижнего кембрия [8]. Оба этих кембрийского возраста рода входят в семейство *Cambrinaceae* Korde, 1973, порядка *Cambrinales* Korde, 1973, класса *Protoflorida-morphyceae* Korde, 1973, отдела *Rhodophyta* [8]. Исходя из этого род *Dzhelindia* Kolosov следует включить в указанное семейство. Как и *Razumovskia*, и *Filaria* – это (*Dzhelindia*) бентосные, населяющие поверхность рыхлого илистого грунта, прикрепленные слизистыми тяжами, реже ризоидами *Rhodophyta* экологической группы эпипелиты [12].

Род *Ulophyton* Timofeev et Germann, 1979 выделен в составе группы *Metaphyta* как объединяющий кустистые разветвленные слоевища. Авторы рода отметили, что по форме слоевища он может быть сравнен с рецентными родами бурых водорослей порядков *Culteriales* и *Dictyotales*. Типовой вид *U. rifeicum* внешне напоминает гаметофит или спорофит представителей этих порядков. Кроме того, указано, что кустообразная форма широко распространена и у красных водорослей [6]. В сводке «Микрофоссилии докембрия СССР», изданной в 1989 г.,

Ulophyton охарактеризован под рубрикой «остатки предположительно бурых и (или) красных водорослей» [13]. В дальнейшем изображение единственного вида *Ulophyton rifeicum* Timofeev et Germann, 1979 Т.Н. Герман в своей работе [14] привела как разветвленное кустистое слоевище.

Ulophyton Timofeev et Germann по ветвлению слоевища, расположению в форме кустика близок к *Dzhelindia* Kolosov, 1970, но имеет значительно меньшие размеры. Внешне он похож на современных зелёных водорослей рода *Codium* Stackhouse, 1797. От них отличается шаровидной формой клеток (у кодиевых клетки трубчатые нитевидные). *Ulophyton rifeicum* имеет клеточное строение, интенсивное ветвление и предположительно органы размножения на терминальных окончаниях нитей (рис. 2). Судя по тому, что слоевище в виде кустика – это бентос из экологической группы эпипелиты.

Как и *Dzhelindia* Kolosov, род *Ulophyton* Timofeev et Germann следует включить в состав семейства *Cambrinaceae* Korde, 1973, порядка *Cambrionales* Korde, 1973, класса *Protofloridomorphophyceae* Korde, 1973, отдела *Rhodophyta*. Отмеченное Б.В. Тимофеевым и Т.Н. Герман [6] как остаток материнской споры, округлой формы образование в основании слоевища *U. rifeicum*, по-видимому, ризоид или базальная клетка (диск), при помощи которой, как указано в диагнозе семейства *Cambrinaceae*, слоевище прикрепляется к грунту. В диагнозе семейства отмечено, что слоевище из однорядной разветвленной нити, имеющей ветви первого и второго порядков и вегетативные нити. Органы размножения терминальные или на месте веточки. Этому диагнозу соответствует род *Ulophyton* Timofeev et Germann.

Итак, произведена биологическая интерпретация родов *Dzhelindia* Kolosov и *Ulophyton* Timofeev et Germann и установлено их систематическое положение, что имеет значение при выяснении ранних этапов развития красных водорослей.

Авторы весьма признательны к.г.-м.н. М.В. Степановой из СНИИГГиМС (Новосибирск) за любезно переданную фотографию *Dzhelindia* из нижней части забитской свиты Восточного Саяна.

Исследования выполнены за счёт финан-

сирования госзадания (№ госрегистрации 01201352157).

Литература

1. Колосов П.Н. Органические остатки верхнего докембрия юга Якутии // Стратиграфия и палеонтология протерозоя и кембрия востока Сибирской платформы. – Якутск: Кн. изд-во, 1970. – С. 57–70.
2. Колосов П.Н. Стратиграфия верхнего докембрия юга Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 156 с.
3. Колосов П.Н. К вопросу о систематике древних *Cyanophyta* // Известковые водоросли и строматолиты (систематика, биостратиграфия, фациальный анализ). – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 19–22.
4. Жабин В.В., Степанова М.В. Нижняя граница юдомия (венда) в районе Боксонского месторождения Восточного Саяна // Материалы по стратиграфии и палеонтологии Сибири. Вып.192. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1974. – С. 30–33.
5. Cao Ruiji and Zhao Wenjie. The Algae Flora of the Tongying Formation (Upper Sinian System) in Southwestern China // Memoirs of Njing Institute of Geology and Paleontology, Academia Sinica. – 1978. – №10. – P. 1–40.
6. Тимофеев Б.В., Герман Т.Н. Докембрийская микробиота лахандинской свиты // Палеонтология докембрия и раннего кембрия: труды Всесоюзного симпозиума (11–14 мая 1976 г., Ленинград). – Л.: Наука, 1979. – С. 137–147.
7. Вологдин А.Г. Археоциты и водоросли среднего кембрия Южного Урала // Проблемы палеонтологии. Вып.5. – М.: Изд-во МГУ, 1939. – С. 210–245.
8. Кордэ К.Б. Водоросли кембрия. – М.: Наука, 1973. – 349 с.
9. Воронова Л.Г., Радионова Э.П. Водоросли и микрофитолиты палеозоя. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
10. Колосов П.Н. Микрофоссилии неопротерозоя востока Сибирской платформы. – Якутск: ОАО «Медиа-холдинг Якутия», 2008. – 88 с. + 32 палеонт. табл.
11. Зинова А.Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – М.; Л.: Наука, 1967. – 399 с.
12. Водоросли: Справочник / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк и др. – Киев: Наукова думка, 1989. – 608 с.
13. Микрофоссилии докембрия СССР / Кол. авторов. – Л.: Наука, 1989. – 191 с.
14. Герман Т.Н. Органический мир миллиард лет назад. – Л.: Наука, 1990. – 50 с.

Поступила в редакцию 20.04.2015

Сканирующая калориметрия фазовых переходов поровых растворов NaCl и CaCl₂ в грунтах при отрицательных температурах

Е.Г. Старостин*, Е.Е. Петров**, О.И. Лаптева***, Н.И. Таппырова*

*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

**Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

***Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

При отрицательных температурах фазовый состав поровой воды определяет весь спектр свойств горных пород и строительных материалов, играет доминирующую роль в происходящих в них физико-химических и механических процессах. Представлены результаты исследования фазовых переходов поровых растворов в различных видах грунтов в широком интервале отрицательной температуры. Исследования фазовых переходов поровых растворов NaCl, CaCl₂ в песке, суглинке и глине проведены на дифференциальном сканирующем калориметре DSC L63. Концентрация растворов NaCl и CaCl₂ варьировалась в интервале от 5 до 20 %. Образцы охлаждались от комнатной температуры до начальной температуры –100°C со скоростью 5 °C/мин. После выстойки при начальной температуре в течение 30 мин образцы нагревали до 10 °C со скоростью 2 °C/мин. Исследования подтверждают сложный характер влияния твердого скелета горных пород на условия фазового равновесия порового раствора и показывают необходимость подробных исследований фазового состава засоленных грунтов в каждом конкретном случае. Показано, что под воздействием твердого скелета горных пород и растворенных веществ происходит сдвиг эвтектических температур, который зависит от дисперсности твердого скелета и концентрации порового раствора.

Ключевые слова: дифференциальный сканирующий калориметр, фазовый состав, фазовые переходы, криолитозона, эндотермический эффект, незамерзшая вода, поровый раствор, эвтектика, дисперсная среда, высокодисперсный грунт.

Research of Phase Transitions Pore Solutions of NaCl and CaCl₂ on a Differential Scanning Calorimeter DSC

E.G. Starostin*, E.E. Petrov**, O.I. Lapteva***, N.I. Tappyrova*

* Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

**Institute of Mathematics and Informatics North-Eastern Federal University, Yakutsk

***Physics and Technology Institute North-Eastern Federal University, Yakutsk

At negative Celsius temperatures the phase composition of pore water determines the whole spectrum of rocks' and construction materials' properties. It has a dominant role in the physical, chemical and mechanical processes which take place in them. The paper presents some results of the phase transitions study of pore solutions in a variety of soils over a wide range of negative temperatures. The studies of NaCl, CaCl₂ pore solutions phase transitions in sand, loam and clay were carried out using a differential scanning calorimeter DSC L63. The concentration of NaCl and CaCl₂ solutions varied from 5 to 20%. The samples were cooled down from a room temperature to an initial temperature of -100°C at the rate of 5 °C/min. After being kept at an initial temperature for 30 min, the samples were heated to 10°C at the rate of 2°C/min. The studies confirm the complex nature of the influence of rock's hard skeleton onto the phase equilibrium conditions of the pore solution, and show the need for detailed studies of the saline soils phase composition in each particular

*СТАРОСТИН Егор Гаврильевич – д.т.н., директор, e.g.starostin@iptpn.ysn.ru; **ПЕТРОВ Егор Егорович – д.т.н., проф., тел. (4112)49-69-65; ***ЛАПТЕВА Ольга Ивановна – ст. преподаватель, аспирант, laptevaio06@mail.ru; *ТАППЫРОВА Надежда Ивановна – вед. инженер, nadejda.tappyrova@yandex.ru.

case. It is shown that rock's hard skeleton and solutes are the factors influencing the shift of the eutectic temperatures, which depends on the dispersion of the hard skeleton and pore solution concentration.

Key words: differential scanning calorimeter, phase composition, phase transitions, permafrost, endothermic effect, unfrozen water, pore solution, eutectic, dispersion medium, finely ground.

Введение

При отрицательных температурах фазовый состав поровой воды определяет весь спектр свойств таких дисперсных сред, как горные породы и строительные материалы, и играет доминирующую роль в физико-химических и механических процессах, происходящих в них [1]. Поэтому строительство и эксплуатация инженерных сооружений в криолитозоне, обеспечение их устойчивости каким-то образом все равно увязываются со знанием закономерностей формирования фазового состава поровой воды. Фазовый состав поровой воды формируется в результате совместного действия многих факторов, одним из которых является наличие в поровой воде растворенных веществ. Как естественное, так и интенсивно прогрессирующее техногенное засоление грунтов широко распространено в криолитозоне. Ввиду всего этого, исследования фазового состава поровой влаги засоленных дисперсных сред имеют актуальность, как в научно-теоретическом, так и практическом направлении.

Фазовый состав многокомпонентной системы, которыми являются горные породы и строительные материалы, содержащие в порах растворы, описывается диаграммой фазовых равновесий. Построение диаграмм фазового равновесия является сложным и трудоемким процессом, включающим как подробные экспериментальные исследования, так и расчетные методы определения фазовых диаграмм, по данным о свойствах подсистем с меньшим числом компонентов. Хотя исследований свойств поровой воды в грунтах достаточно много [2, 3], но закономерности формирования ее фазового состава при отрицательных температурах с учетом всех факторов изучены весьма слабо.

Известно, что свойства многокомпонентных систем, таких как растворы и сплавы, не удовлетворяют принципу суперпозиции, т.е. не могут быть выведены простым суммированием свойств двойных систем. В горных породах и строительных материалах поровый раствор находится под воздействием и их твердого скелета, что должно отразиться на его фазовом составе при отрицательных температурах.

В работе делается оценка влияния результирующего воздействия твердого скелета горных пород и растворенных веществ на фазовое состояние порового раствора.

Материалы и методы исследования

Нами исследованы фазовые переходы поровых растворов в различных видах грунтов в широком интервале температуры. В исследованиях использован дифференциальный сканирующий калориметр DSC L63. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии широко используется для исследования и описания веществ, смесей и материалов, в частности, при изучении замерзания – оттаивания связанной воды в различных материалах [4 – 6].

Охлаждение жидким азотом, применяемое в калориметре, позволяет проводить измерения в диапазоне от $-150...700^{\circ}\text{C}$, что перекрывает необходимый для исследований замерзания – оттаивания воды в горных породах и строительных материалах интервал температуры. Результаты измерения представляются в виде кривых ДСК, на которых фиксируются тепловые эффекты фазовых переходов. В принципе ДСК позволяет количественно оценить тепловые эффекты. Затруднения вызывает получение градуировочной кривой в интервале температуры, в которой проводятся наши исследования, а именно, от -100 до 0°C . Поэтому в данной статье анализируются в основном только температурные данные кривых ДСК.

Исследованы образцы песка, покровского суглинка и глины. Образцы сухого грунта увлажнялись заранее приготовленными растворами NaCl и CaCl_2 необходимой концентрации. Влажность образцов песка и суглинка $20 \pm 2\%$, глины – $25 \pm 2\%$. Концентрация растворов NaCl и CaCl_2 варьировалась в интервале от 5 до 20 %. Образцы с раствором NaCl охлаждали до начальной температуры -60°C , с CaCl_2 – до -140°C .

Образцы охлаждались от комнатной температуры до начальной температуры -100°C со скоростью $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. После выстойки при начальной температуре в течение 30 мин образцы нагревали до 10°C со скоростью $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны кривые ДСК поровых растворов NaCl в песке, суглинке и глине. Для сравнения приведена кривая ДСК объемного раствора NaCl . В песке влияние твердого скелета на раствор является незначительным и для порового раствора в этом случае можно говорить о температуре эвтектики, при которой про-

исходит осаждение кристаллогидрата соли. В подтверждение этого эндотермические пики этого явления одинаковы в песке и объемном растворе, как по форме, так и по температуре. В этом смысле можно говорить о температуре эвтектики порового раствора в песке.

В отличие от этого в высокодисперсных грунтах (в нашем случае суглинке и глине) выпадение соли происходит не при какой-то определенной температуре. В данном случае систему, состоящую из твердого скелета и порового раствора, можно рассматривать как трехкомпонентную и использовать для ее описания теорию фазового равновесия многокомпонентных систем. В интервале между температурой начала замерзания и температурой начала осаждения соли система двухвариантна. Это означает, что для каждого значения засоленности будет своя температурная кривая незамерзшей воды.

При определенной температуре ниже температуры эвтектики объемного раствора, при продолжающейся кристаллизации воды начинается осаждение NaCl. Притом температура начала осаждения ниже температуры эвтектики объемного раствора и зависит от засоления. При дальнейшем понижении температуры постепенно происходит совместная кристаллизация воды и NaCl. В этом диапазоне температуры система одновариантна, т.е. при постоянном давлении каждой температуре соответствует единственный состав системы. Это означает, что температурная кривая незамерзшей воды не зависит от засоленности.

Приведенные в работе [7] температурные кривые незамерзшей воды в засоленных NaCl глинах как будто противоречат этому. При разной степени начальной концентрации порового раствора, что означает разную степень засоления, ниже температуры начала осаждения NaCl температурные кривые незамерзшей воды при разной засоленности не совпадают. Причинами этого могут быть адсорбция из раствора на поверхности твердых частиц, капиллярные явления. Также следует учесть, что в данном диапазоне температуры при расчете теплового баланса должны быть учтены тепловые эффекты не только замерзания (оттаивания) воды, но и осаждения (растворения) NaCl.

Видно, что повышение дисперсности грунта вызывает большее смещение температуры начала осаждения соли из порового раствора. Эндотермический эффект фазового перехода в суглинке и глине начинает проявляться при температуре ниже -30°C и с повышением температуры нарастает постепенно (рис. 1).

Подобная картина наблюдается и в поровом растворе CaCl₂ (рис. 2), т.е. повышение дис-

персности грунта вызывает смещение и размывание пика, определяемого осаждением CaCl₂, на кривой ДСК. В этом интервале температуры происходит совместная кристаллизация воды и CaCl₂.

На рис. 3 приведены кривые ДСК порового раствора CaCl₂ в песке, суглинке и глине при $C = 5\%$. В случае порового раствора CaCl₂ с концентрацией 5% в песке наблюдаются два пика. Первый пик при более высокой температуре соответствует кристаллизации воды, которая происходит в спектре температуры. Второй пик связан с эвтектическим фазовым переходом порового раствора. Ниже этой температуры в песке практически весь поровый раствор находится в кристаллическом состоянии.

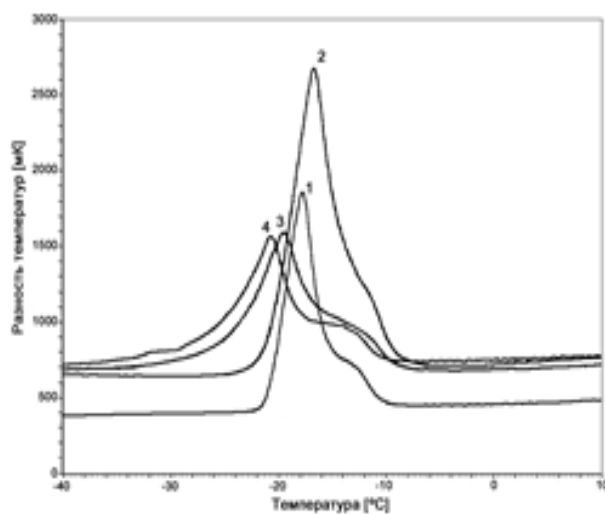


Рис. 1. Кривые ДСК порового раствора NaCl в зависимости от вида грунта. Концентрация раствора $C = 15\%$: 1 – объемный раствор; 2 – песок; 3 – суглинок; 4 – глина

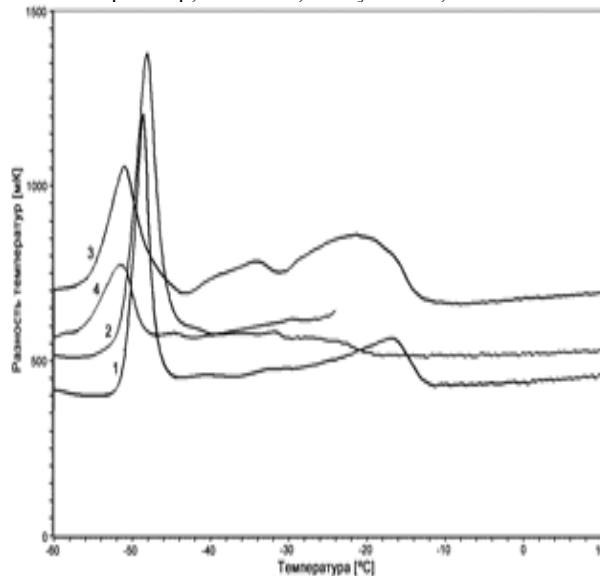


Рис. 2. Кривые ДСК порового раствора CaCl₂ в зависимости от вида грунта. Концентрация раствора $C = 20\%$: 1 – объемный раствор; 2 – песок; 3 – суглинок; 4 – глина

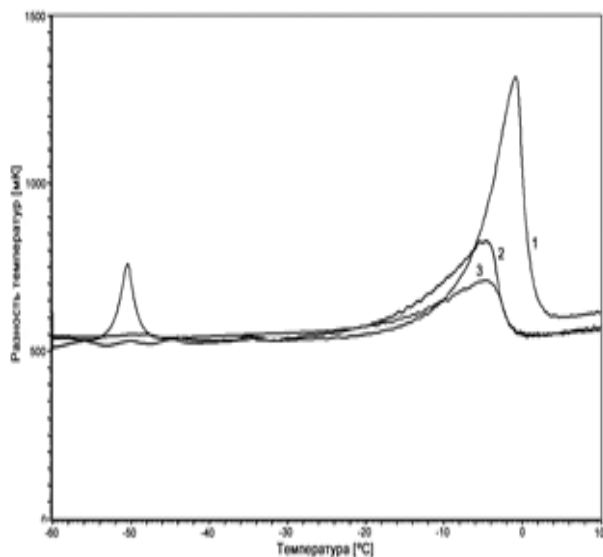


Рис. 3. Кривые ДСК порового раствора CaCl_2 в песке, суглинке и глине.
Концентрация раствора $C = 5\%$: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – глина

При малых концентрациях порового раствора CaCl_2 повышение дисперсности грунта приводит к исчезновению на кривой ДСК пика, характеризующего осаждение CaCl_2 . Это означает, что на поверхности ликвидуса в пространственной диаграмме состояния тройной системы при уменьшении концентрации CaCl_2 исчезает линия вторичного выделения (кристаллизации CaCl_2). Это выражается на кривой ДСК исчезновением пика около -50°C в случае суглинка и глины (рис. 3). Этот пик на кривой ДСК отсутствует и при концентрации порового раствора 10% . Повышение концентрации до 15% вызывает его появление.

Фазовые переходы многокомпонентных поровых растворов исследованы при комбинированном засолении грунтов обоими солями NaCl и CaCl_2 (рис. 4). Как было сказано выше, в песке поровый раствор можно считать находящимся вне действия твердого скелета. В соответствии с этим, на кривой ДСК при комбинированном засолении песка солями NaCl и CaCl_2 наблюдаются два четких пика. Первый пик характеризует начало кристаллизации воды и NaCl . Пики, определяемые началом кристаллизации воды и NaCl , накладываются друг на друга. При дальнейшем понижении температуры происходит постепенное одновременное затвердевание воды и NaCl . Этому соответствует пологий спуск с пика при понижении температуры в этом интервале.

Второй пик означает тройную эвтектику трехкомпонентного водного раствора NaCl и CaCl_2 , при которой происходит затвердевание

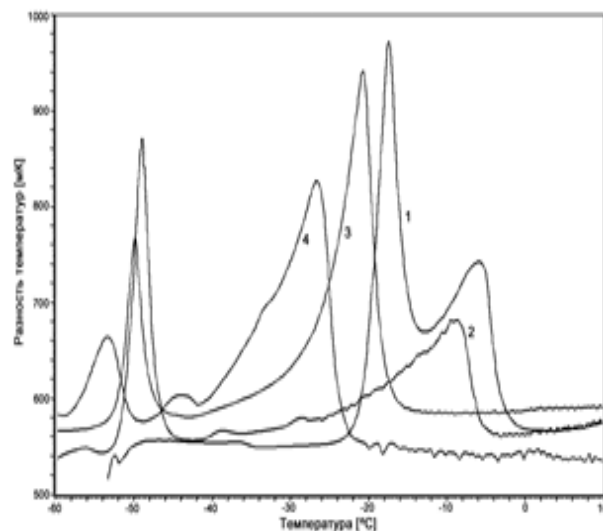


Рис. 4. Кривые ДСК оттаивания порового раствора при комбинированном засолении песка и глины.

Концентрации раствора: $C(\text{NaCl}) = 10\%$; $C(\text{CaCl}_2) = 15\%$:
1 – песок + раствор NaCl ; 2 – песок + раствор CaCl_2 ; 3 – песок + раствор NaCl и CaCl_2 ; 4 – глина + раствор NaCl

оставшегося раствора без изменения состава. Резкий пик показывает наличие эвтектического фазового перехода. Как и следует ожидать, температура тройной эвтектики несколько ниже температуры эвтектики бинарного раствора CaCl_2 . В области температуры ниже тройной эвтектики вся вода практически находится в замёрзшем состоянии.

В глине, в которой взаимодействие порового раствора с твердыми частицами скелета является сильным, картина несколько меняется (рис. 4). В данном случае пики, определяемые началом кристаллизации воды и NaCl , также накладываются друг на друга. Оба пика сдвигаются в сторону более низких температур и становятся более пологими. Все это объясняется влиянием твердого скелета грунтов на фазовое состояние порового раствора.

Результаты исследований могут быть полезны для построения диаграмм фазовых равновесий поровых растворов в грунтах, особенно тем, что кривые ДСК позволяют выявить так называемые замечательные точки и линии [8]. Эти точки и линии, представляющие те или иные особенности фазовых диаграмм (например, максимумы, минимумы, эвтектические и сингулярные точки), чрезвычайно важны для их построения.

Заключение

Исследования подтверждают сложный характер влияния твердого скелета горных пород на условия фазового равновесия порового раствора и показывают необходимость подробных иссле-

дований фазового состава засоленных грунтов в каждом конкретном случае. Использование простых грубых приближений при описании фазового состояния поровых растворов может приводить к ощутимым непрогнозируемым ошибкам.

Под результирующим воздействием твердого скелета горных пород и растворенных веществ происходит сдвиг эвтектических температур, который зависит от дисперсности твердого скелета и концентрации порового раствора. Поэтому только в результате построения диаграмм состояния, которые учитывают данную зависимость, можно подробно описать фазовый состав порового раствора в высокодисперсных грунтах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00328).

Литература

1. Еришов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверев В.Г. и др. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 190 с.
2. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства свя-

занной воды в дисперсных породах. Часть I. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, поверхностное натяжение // Криосфера Земли. – 2014. – № 3. – С. 46–54.

3. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть II. Теплота кристаллизации // Криосфера Земли. – 2014. – № 4. – С. 39–46.

4. A DSC study of thermal transitions of apple systems at several water contents // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2000. – Vol. 61. – P. 351–362.

5. Lee K.Y., Ha W.S. DSC studies on bound water in silk fibroin/S-carboxymethyl keratine blend films // Polymer. – 1999. – Vol. 40. – P. 4131–4134.

6. Liesebach J., Lim M., Rades T. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC // Thermochimica Acta. – 2004. – Vol. 411. – P. 43–51.

7. Степанов А.В. Влияние растворенных солей на теплофизические свойства глинистого грунта // Разработка методов тепловой защиты для инженерных сооружений на Крайнем Севере. – Якутск: изд. ЯГУ, 1983. – С. 68–78.

8. Аносов В.Я., Озерова М.И., Филалов Ю.Я. Основы физико-химического анализа. – М.: Наука, 1976. – 504 с.

Поступила в редакцию 15.08.2015

УДК 622.24.051.624

Оптимизация процесса оттайки мерзлого грунта при бурении скважин

Н.Г. Тимофеев, Р.М. Скрыбин, Б.В. Яковлев

Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

Рассматриваются предложения по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента (долота) при бурении скважин в условиях многолетнемерзлых пород в районах Северо-Востока и арктической зоны страны с экстремальными природно-климатическими условиями и с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород, где к выбору оптимальных способов и технологий разведки месторождений предъявляются особые требования. Месторождения зоны многолетней мерзлоты имеют существенные отличия от аналогов, расположенных в районах с умеренным климатом и положительной температурой пород. Специфика их обусловлена комплексным взаимодействием и влиянием горно-геологических, горнотехнических, мерзлотных и климатических факторов. В основе осложненных условий бурения скважин в многолетнемерзлых породах лежит температурный фактор, определяющий эффективность процесса разрушения и транспортировки мерзлых горных пород. В процессе разрушения мерзлой горной породы при контакте резцов с горным массивом в области рабочей поверхности резцов интенсифицируется тепловыделение. С целью минимизации выделяемого тепла путем аналитических исследований выявлены закономерность теплообразования на поверхности резцов и зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса расположения резцов $T=f(r)$ породоразрушающего инструмента (долота) при резании мерзлой породы. На основании полученных данных предлагается усовершенствованный вариант породоразрушающего инструмента (долота), который обеспечивает эффективное разрушение забоя скважины и минимизирует выделения тепла.

ТИМОФЕЕВ Николай Гаврильевич – ст. преподаватель, yakutsk_09@mail.ru; СКРЯБИН Рево Миронович – к.т.н., проф., зав. каф., yakutsk_09@mail.ru; ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.ф.-м.н., проф., b-yakovlev@mail.ru

дований фазового состава засоленных грунтов в каждом конкретном случае. Использование простых грубых приближений при описании фазового состояния поровых растворов может приводить к ощутимым непрогнозируемым ошибкам.

Под результирующим воздействием твердого скелета горных пород и растворенных веществ происходит сдвиг эвтектических температур, который зависит от дисперсности твердого скелета и концентрации порового раствора. Поэтому только в результате построения диаграмм состояния, которые учитывают данную зависимость, можно подробно описать фазовый состав порового раствора в высокодисперсных грунтах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00328).

Литература

1. Еришов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверев В.Г. и др. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 190 с.
2. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства свя-

занной воды в дисперсных породах. Часть I. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, поверхностное натяжение // Криосфера Земли. – 2014. – № 3. – С. 46–54.

3. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть II. Теплота кристаллизации // Криосфера Земли. – 2014. – № 4. – С. 39–46.

4. A DSC study of thermal transitions of apple systems at several water contents // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2000. – Vol. 61. – P. 351–362.

5. Lee K.Y., Ha W.S. DSC studies on bound water in silk fibroin/S-carboxymethyl keratine blend films // Polymer. – 1999. – Vol. 40. – P. 4131–4134.

6. Liesebach J., Lim M., Rades T. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC // Thermochimica Acta. – 2004. – Vol. 411. – P. 43–51.

7. Степанов А.В. Влияние растворенных солей на теплофизические свойства глинистого грунта // Разработка методов тепловой защиты для инженерных сооружений на Крайнем Севере. – Якутск: изд. ЯГУ, 1983. – С. 68–78.

8. Аносов В.Я., Озерова М.И., Филалов Ю.Я. Основы физико-химического анализа. – М.: Наука, 1976. – 504 с.

Поступила в редакцию 15.08.2015

УДК 622.24.051.624

Оптимизация процесса оттайки мерзлого грунта при бурении скважин

Н.Г. Тимофеев, Р.М. Скрыбин, Б.В. Яковлев

Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

Рассматриваются предложения по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента (долота) при бурении скважин в условиях многолетнемерзлых пород в районах Северо-Востока и арктической зоны страны с экстремальными природно-климатическими условиями и с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород, где к выбору оптимальных способов и технологий разведки месторождений предъявляются особые требования. Месторождения зоны многолетней мерзлоты имеют существенные отличия от аналогов, расположенных в районах с умеренным климатом и положительной температурой пород. Специфика их обусловлена комплексным взаимодействием и влиянием горно-геологических, горнотехнических, мерзлотных и климатических факторов. В основе осложненных условий бурения скважин в многолетнемерзлых породах лежит температурный фактор, определяющий эффективность процесса разрушения и транспортировки мерзлых горных пород. В процессе разрушения мерзлой горной породы при контакте резцов с горным массивом в области рабочей поверхности резцов интенсифицируется тепловыделение. С целью минимизации выделяемого тепла путем аналитических исследований выявлены закономерность теплообразования на поверхности резцов и зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса расположения резцов $T=f(r)$ породоразрушающего инструмента (долота) при резании мерзлой породы. На основании полученных данных предлагается усовершенствованный вариант породоразрушающего инструмента (долота), который обеспечивает эффективное разрушение забоя скважины и минимизирует выделения тепла.

ТИМОФЕЕВ Николай Гаврильевич – ст. преподаватель, yakutsk_09@mail.ru; СКРЯБИН Рево Миронович – к.т.н., проф., зав. каф., yakutsk_09@mail.ru; ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.ф.-м.н., проф., b-yakovlev@mail.ru

Ключевые слова: бурение скважин, мерзлые породы, температура в скважине, породоразрушающий инструмент, долото, забурник, оптимальный угол резания, конструктивные углы резцов, разведка месторождений, теплообмен в скважине, оттайка породы.

Optimization of the Process for Thawing Frozen Ground During Drilling

N.G. Timofeev, R.M. Skryabin, B.V. Yakovlev

North-Eastern Federal University, Yakutsk

Proposals for improving the design of rock cutting tool (bit) during drilling in permafrost conditions in areas of the North-East and Arctic regions are considered. The extreme climatic conditions of the regions and thick layers of permafrost rocks bring about special requirements for methods and technology of exploration. Deposits of the permafrost zone have significant differences from deposits located in areas with a temperate climate and positive temperature rocks due to a complex interaction and the influence of geological, mining, permafrost and climatic factors. The basis of the complicated conditions of drilling in permafrost temperature is the temperature factor that determines the efficiency of the process of destruction and transportation of frozen rocks. In the process of destruction of frozen rocks, upon contact of the cutters with rocks in the area of the working surface of incisors the heat dissipation is enhanced. Analytical studies of the regularities of heat formation on the surface of the incisors are carried out and the dependence of heat generated on the wellbore from the radius of the rock cutting tool (bit) cutters location $T=f(r)$ when cutting frozen rocks is revealed. On the basis of the obtained data, we propose an improved version of rock cutting tool (bit), which provides effective destruction of the borehole bottom and minimizes the heating.

Key words: drilling, permafrost, temperature in a borehole, rock cutting tool, chisel, jumper, optimum cutting angle, constructive corners of cutters, exploration, heat transfer in a borehole, rock defrosting.

При бурении скважин шнековым способом наивысшие скорости возможны только при достижении соответствия между интенсивностью разрушения (резания) горных пород на забое и транспортирования выбуренной породы на поверхность. Эффективность разрушения мерзлых пород на забое скважины и очистка забоя скважины от бурового шлама прямо зависят от типа и конструкции породоразрушающего инструмента [1–6].

На выбор параметров породоразрушающего инструмента решающее влияние оказывают физико-механические свойства многолетнемерзлых пород.

Под параметрами породоразрушающего инструмента понимаются такие конструктивные элементы, как геометрия режущих элементов (размеры, форма резцов и корпуса), схема расположения резцов на буре, а также транспортирующие лопасти бура [3, 7, 8].

Исследования по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента

Бугаев В.Г. в работе [3] отмечает, что особое влияние на скорость и энергоёмкость процесса бурения, а также на стойкость и прочность породоразрушающих инструментов оказывают углы режущих элементов, характеризующиеся углами задними α , передними β , заострения δ и

резания γ , связанных между собой следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha + \delta + \beta = 90^\circ \\ \gamma = \alpha + \delta \end{cases}$$

– угол заострения δ устанавливается исходя из технико-технологических требований сооружения скважин. В практике принято его считать равным $70\text{--}90^\circ$;

– на износостойкость и прочность режущих элементов резцов особое влияние оказывает передний угол β . Передние углы бывают нулевые $\beta = 0$, положительные $\beta > 0$ и отрицательные $\beta < 0$. При бурении пород средней крепости (IV–VII) рекомендуется применять передний угол, равным $\beta = -15^\circ$, а по мягким породам – $\beta = 0$ и даже положительных до 15° ;

– задний угол α , угол между главной задней поверхностью резца и плоскостью резания. Служит для уменьшения трения между задней поверхностью резца и забоем скважины. При конструировании резцов породоразрушающего инструмента обычно принимается равным $20\div 30^\circ$, при этом необходимо соблюдать следующее условие: не рекомендуется слишком увеличивать задний угол резцов при бурении крепких пород, поскольку это приводит к ослаблению прочности режущих кромок и их полкам;

– основным углом режущего элемента является угол резания γ , который в зависимости от

категорий разрушаемых пород устанавливается в пределах от 60 до 115°. При бурении талых грунтов и мягких пород более оптимальными считаются углы резания, равные 50–70°. При бурении прочных мерзлых пород с твердыми включениями рекомендуется угол резания от 70 до 115°. Увеличение угла резания от заданных значений приводит к возрастанию сопротивления мерзлых пород резанию.

Также важную роль при конструировании режущего элемента породоразрушающего инструмента оказывает форма передней грани [3, 6, 8]. В настоящее время известны следующие виды передних граней резцов: плоские, овальные, в виде клина, трапеции, призмы и др. В работах ряда авторов проведены исследования и даны четкие рекомендации по влиянию форм передних граней резцов на процесс разрушения горных пород в различных горно-геологических условиях.

На основании анализа литературных данных и практики бурения скважин, обзора проведенных научно-исследовательских работ, лучших отечественных и зарубежных конструкций буров с учетом физико-механических свойств многолетнемерзлых пород рекомендуются следующие технико-технологические основы конструирования породоразрушающего инструмента для бурения скважин большого диаметра в условиях криолитозоны:

1. Центральный опережающий резец (забурник) в процессе бурения обеспечивает центрирование породоразрушающего инструмента в скважине. Но как показывает практика бурения скважин по мерзлым песчано-галечниковым отложениям, чем больше диаметр породоразрушающего инструмента, тем малоэффективна функция забурника. Это связано с тем, что при резании резцами, расположенными по концентрическим кругам с разной окружной скоростью v , понижающейся от периферии к центру забоя скважины, достигая по оси центрального опережающего резца (забурника) $v=0$, разрушение породы забурником происходит только за счет раздавливания под осевой нагрузкой C_0 без резания. Таким образом, центральная опережающая часть (забурник) превращается в своего рода опорный элемент вращающегося породоразрушающего инструмента и замедляет механическую скорость бурения $V_{мех}$. Исходя из этого необходимо видоизменить конструкцию породоразрушающего инструмента, устранив опережающий центральный резец (забурник).

2. Резцы в породоразрушающем инструменте должны быть сменными и удобными для быстрой замены при износе или поломках.

3. Рациональная форма, размеры и геометрия режущих элементов породоразрушающего инструмента должны обеспечивать минимальные энергозатраты при разрушении мерзлых горных пород. Этим требованиям наиболее отвечает цилиндрическая остроконечная форма резца [8].

4. Основные показатели бурения во многом зависят от правильного выбора оптимального угла резания γ резцов.

Вопросами влияния оптимального угла резания γ при бурении скважин в мерзлых породах занимались многие исследователи [1, 3, 4, 6, 8]. В настоящее время не даны четкие рекомендации по выбору оптимального угла резания и с учетом заключений авторов оптимальным считается угол от 30 до 40°. Однако, учитывая существенное повышение прочностных свойств мерзлых песчано-глинистых пород, считаем возможным увеличение угла резания γ до 50–60°.

5. Для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях должен применяться породоразрушающий инструмент со специальными резцами. Расположение резцов по высоте должно обеспечивать эффективное разрушение горной породы на забое. При этом резцы должны иметь минимальную и достаточную площадь контакта с горным массивом: минимальную – для уменьшения выделяемой теплоты и достаточную – для обеспечения объемного разрушения мерзлых пород на забое скважины [8].

Главным осложняющим фактором сооружения скважин в условиях многолетнемерзлых пород является процесс теплообразования на забое в процессе резания мерзлой горной породы.

Тепловое явление, возникающее при разрушении мерзлой горной породы, объясняется тем, что в процессе бурения при контакте резцов с горным массивом в области рабочей поверхности повышается интенсивность нагрева режущих элементов и из-за перехода механической энергии разрушения горных пород в тепловую энергию [9].

Для полноты процесса распределения температуры на режущей поверхности породоразрушающего инструмента рассмотрим резание породы вращательным движением бура. При этом резцы бура распределены равномерно в один ряд вдоль его диаметра.

При резании горной породы породоразрушающим инструментом с некоторой угловой скоростью на его режущей поверхности происходит нагревание. При этом часть работы трения идет на нагревание поверхности бура Q , а некоторая часть – на резание породы A_d . Если бы работа сил трения полностью преобразовывалась только в тепло, тогда была бы линейная

зависимость распределения температуры на поверхности бура. То есть температура рабочей поверхности, начиная с некоторого значения в центральной области бура, монотонно увеличивалась бы с расстоянием при перемещении к периферийной области. Учет той части работы силы трения, которая идет на резание породы, приводит к немонотонной зависимости распределения температуры вдоль радиуса рабочей поверхности, а именно, распределение температуры имеет максимум в области между центром и периферией бура. Это связано с тем, что на периферийной части бура работа на резание породы увеличивается пропорционально площади.

При резании работа прямо пропорциональна объему истираемой породы. Коэффициент истираемости определяется как отношение объема истираемой породы на затраченную работу $a = \Delta V / \Delta A$ [9].

Таким образом, для элементарной работы силы трения имеем выражение:

$$dA = F_t dl = dQ + A_a = dQ + dV/a, \quad (1)$$

где dl – перемещение резца за время dt , dQ – теплота, выделяемая при трении; dV/a – работа, затрачиваемая на дробление (истирание) породы пропорциональна объему истираемой породы; a – коэффициент пропорциональности.

Для решения задачи сделаем следующие приближения: так как основной рабочей поверхностью является поверхность резца, будем учитывать только ту теплоту, которая выделяется в объеме резца, и пренебрегаем количеством теплоты, уходящим вместе с разрушенной породой. Уравнение (1) делим на dt и получаем:

$$mC \frac{dT}{dt} = \mu N \frac{dl}{dt} - \frac{h_e r^2}{a} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения; N – сила нормального давления приблизительно равна F_0 ; h_e – эффективная глубина резания; r – расстояние от центра рабочей поверхности бура до резца; m – масса резца; c – его удельная теплоемкость.

$v = dl/dt$ – линейная скорость резца, которая равна $v = \omega r$, где $d\varphi/dt = \omega$ – угловая скорость бура.

Поставляя значение линейной скорости и угловой скорости в (2), получаем:

$$mC \frac{dT}{dr} \omega r = \mu N \omega r - \frac{h_e}{a} r^2 \omega, \quad (3)$$

то есть обыкновенное линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно $T(r)$.

Интегрируя уравнение (3)

$$\int dT = \int \frac{\mu N}{mC} dr - \int \frac{h_e}{mCa} r dr,$$

получаем распределение температуры на рабочей поверхности

$$T(r) = \frac{\mu N}{mC} r - \frac{h_e}{2mCa} r^2 + \text{const}. \quad (4)$$

Константу интегрирования определяем из граничного условия. Например, в средней части бура температура имеет некоторую отрицательную величину и т.д.

На рис. 1 представлено распределение температуры согласно (4) вдоль радиуса рабочей поверхности в зависимости от радиуса расположения резцов $T=f(r)$ (сплошная линия) при заданных значениях параметров (коэффициент трения $\mu = 0,2$, сила нормального давления 2500 Н, удельная теплоемкость резца 900 Дж/кг, эффективная глубина резания 0,01 м, коэффициент резания 0,00005, температура в центре бура -20°C). Пунктирной линией изображено линейное распределение, при котором не учитывается работа, затрачиваемая на разрушение породы.

Как видно из рис. 1, максимальная температура приходится в области между центром и периферией породоразрушающего инструмента (рис.2).

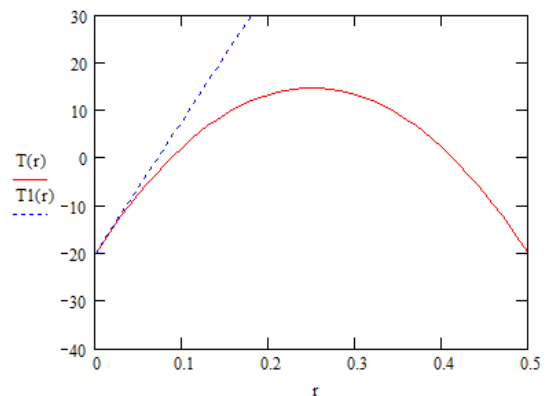


Рис.1. Зависимость выделяемой теплоты от радиуса расположения резцов $T=f(r)$

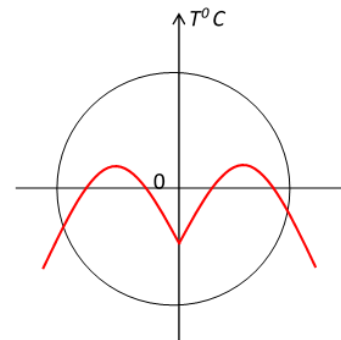


Рис. 2. Образование максимальной температуры в буре

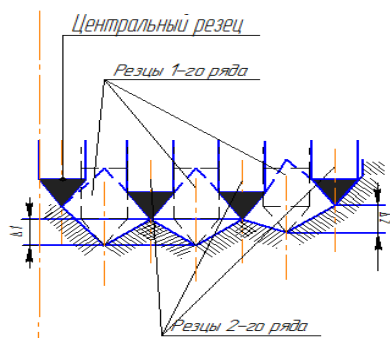


Рис. 3. Разная высота резцов породоразрушающего инструмента

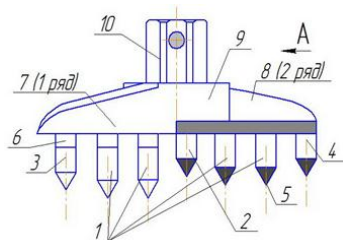


Рис. 4. Ступенчатое расположение резцов.

Условные обозначения: 1, 3 и 4 – рабочие резцы; 2 – центральный резец; 5 – твердосплавные режущие пластины; 6 – дополнительная вставка; 7 – первый ряд; 8 – второй ряд; 9 – корпус долота; 10 – хвостовик.

Заявка на изобретение №2014130654 от 24.07.2014 г.

В этой области образовавшаяся положительная температура при резании интенсифицирует растепление мерзлых пород, которые с последующим примерзанием и смерзанием к поверхности бура и стенкам скважины приводят к снижению эффективности работы породоразрушающего инструмента и шнекового транспортера. В области рабочей поверхности породоразрушающего инструмента с максимальной положительной температурой уменьшение выделяемой теплоты можно достичь путем конструирования специального двухлопастного породоразрушающего инструмента, в котором резцы на лопастях расположены по одному ряду с разными высотами (рис.3), при этом резцы одного ряда по концентрическим кругам при вращении проходят между резцами второго ряда, в этом случае обеспечивается объемное разрушение мерзлой породы на забое с минимизацией выделяемой температуры.

Ступенчатое расположение и разные рабочие углы резцов усовершенствованной конструкции двухлопастного долота (рис.4) при бурении скважин обеспечат эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим процессом теплообразования. Устранение центрального опережающего резца позволяет повысить механическую скорость $V_{мех}$ за счет ликвидации эффекта центральной опорной точки по оси долота с нулевой окружной скоростью $v=0$.

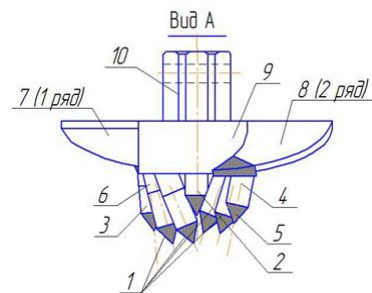


Рис. 5. Усовершенствованный вид породоразрушающего инструмента (долота).

Условные обозначения см. на рис. 4

По результатам проведенного исследования разработана усовершенствованная конструкция породоразрушающего инструмента (долота) для бурения скважин в условиях многолетнемерзлых пород (рис.5) путем устранения опережающего центрального резца с нулевой окружной скоростью вращения и ступенчатого расположения на двухлопастном буре резцов разной высоты, обеспечивающего эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим процессом теплообразования в скважине.

Литература

1. Басов И.Г. Исследование влияния формы режущей части инструмента на износостойкость при разрушении мерзлых грунтов // Исследование землеройных машин. – Томск: Изд-во ТПУ, 1977. – С. 39–44.
2. Бейсебаев А.М. Бурение скважин и горно-разведочные работы. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
3. Бугаев В.Г. Исследование процесса, разработка конструкции режущего инструмента и обоснование режимов вращательного бурения скважин: Дис. ... к.т.н. – Красноярск, 2004. – 307 с.
4. Грабчак Л.Г. Горно-разведочные работы. – М.: Высшая школа, 2003. – 661 с.
5. Минаков В.М. Влияние температурного режима в скважинах большого диаметра на бурение и качество опробования при разведке мерзлых россыпей // Геология и разведка. – 1991. – № 3. – С. 73–85.
6. Шевченко А.Н. Выбор рационального типа бурового инструмента и системы очистки скважин при бурении мерзлых пород: Дис. ... к.т.н. – Иркутск, 2007. – 128 с.
7. Карпиков А.П. Бурение горно-разведочных и технических выработок: Учеб.-справочное пособие. – М.: МГИУ, 2003. – 102 с.
8. Линьков С.А. Разработка конструкции и обоснование параметров рабочего органа для бурения скважин в мерзлых грунтах: Дис. ... к.т.н. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2007. – 185 с.
9. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 222 с.

Поступила в редакцию 15.03.2015

Новые способы разработки малообъемных алмазных месторождений и доработки подкарьерных запасов алмаза

С.А. Ермаков, Л.Н. Федоров

Институт горного дела Севера СО РАН, г.Якутск

Дан краткий обзор и предложены новые способы разработки малообъемных кимберлитовых месторождений и выемки подкарьерных и подшахтных запасов алмаза. Суть бурового способа заключается в том, что рудное поле разбивается на прилегающие друг к другу правильные шестиугольники со стороной, равной диаметру бурильной скважины. Затем проводится выбуривание керна кимберлита большого диаметра с центром на вершинах и в центре правильных шестиугольников. Керна подрезаются механическим способом из полости центральной скважины и вынимаются стреловым самоходным краном. При этом для подрезки керна центральной скважины в ее центре бурится вспомогательная скважина. Показано также, что выдача на поверхность полезного ископаемого в виде керна большого диаметра предполагает широкий диапазон способов дальнейшей дезинтеграции, чем на забое скважины. Новизна способов подтверждается патентами РФ. Особенностью способов является возможность их использования как в геологоразведке для проходки шурфов и канав, так и в строительстве для проходки глубоких ям и котлованов.

Ключевые слова: малообъемное месторождение, алмаз, скважина, керн, выбуривание, закладка.

New Methods of Development of Small Volume Diamond Deposits and Excavation of Undersurface Reserves

S.A. Ermakov, L.N.Fedorov

Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk

A short review is given and new methods of the development of small-volume kimberlite fields and excavation of undersurface and undermine reserves of diamonds are suggested. The essence of the drilling method is that an ore field is divided into adjacent to each other regular hexagons with sides equal to the diameter of a drilling well. Then of kimberlite cores of large diameter with the centers at the apexes and in the center of the regular hexagons are drilled. The cores are cutted by mechanical method from the cavity of the central well and are excavated by a self-propelled mobile crane. For cutting the core of the central well a secondary bore hole is bored in its center. It is shown that delivery to the surface of a mineral in the form of a core of large diameter allows a broader line of methods of further disintegration, than at a bottom hole. The novelty of the methods is confirmed by the patents of the Russian Federation. The feature of the methods is a possibility of their use as in geological exploration for pits and trenches, and in construction for deep holes and foundation pits.

Key words: small-volume field, diamond, well, core, drilling out, backfilling.

Введение

В Республике Саха (Якутия) известно около 800 кимберлитовых трубок, однако только около 20% считаются алмазоносными, при этом на

учете Госкомиссии по запасам состоит их малая часть. По основной массе алмазоносных месторождений балансовые запасы не подсчитаны ввиду незначительного содержания алмазов или небольшого объема самих кимберлитовых тел. Морфологические особенности трубкообразных алмазных месторождений, заключающиеся в относительно быстром сужении и переходе от раструба в дайкообразные и жильные формы с малыми размерами поперечного сечения, за-

ЕРМАКОВ Сергей Александрович – к.т.н, с.н.с., зав. лаб., s.a.ermakov@igds.ysn.ru; ФЕДОРОВ Лазарь Николаевич – н.с., lnfedorov@mail.ru.

трудняют и даже делают невозможным рентабельную полную отработку таких месторождений традиционными способами.

На сегодняшний день крупные и богатые месторождения, такие как «Мир», «Удачная», «Интернациональная» и «Айхал», отрабатываемые на первом этапе карьерами, будут дорабатываться подземным способом. При этом не решается вопрос последующей выемки подшахтных запасов. Поэтому разработка новой техники и технологии отработки малообъемных алмазных месторождений и доработки подкарьерных и подшахтных запасов является весьма актуальной проблемой.

Краткий обзор и анализ существующих способов выемки

В настоящее время из известных способов добычи полезного ископаемого, наиболее отвечающих условиям разработки малообъемных трубок с минимальными вспомогательными операциями, является способ добычи строительного камня выбуриванием керна большого диаметра [1]. Такой способ может осуществляться различными устройствами для колонкового бурения скважин большого диаметра, например, механическим колонковым буром [2] или способом механизированной проходки шахтных стволов.

Однако существенным недостатком выбуривания керна большого диаметра, препятствующим его широкому распространению, является невозможность размещения мощных крупногабаритных устройств, для отделения керна от массива, в полость вспомогательной скважины малого диаметра. Применение кумулятивных зарядов ВВ ограничивается требованиями кристаллосбережения. Однако можно предположить, что с появлением новых конструктивных и инструментальных материалов будут созданы компактные устройства для отделения керна диаметром 3–6 м, что сделает этот способ высококонкурентным и эффективным.

Известен способ механизированной проходки шахтных стволов посредством кольцевого проходческого агрегата, подвешенного вместе с керноприемником на вышке при помощи грузоподъемных механизмов. КERN отделяется от массива накладными кумулятивными зарядами ВВ, встроенными в нижней части керноприемника. Отличительной особенностью этого способа является то, что наземное оборудование выполняет только функции опускания и подъема проходческого (бурового) оборудования и керна из скважины. Существенный недостаток – применение взрывчатых веществ.

Буровые способы начинают применяться при

подземной разработке кимберлитовых трубок. На руднике «Интернациональный» успешно прошел испытания способ подземной отработки, включающий бурение скважин большого диаметра [3]. Суть способа заключается в том, что пробуривается в межэтажном целике мощностью 300 м пилотная скважина диаметром 300 мм и обратным ходом разбуривается, образуя выработку диаметром до 5 м. Отбитая порода на нижнем горизонте убирается погрузочно-доставочными средствами.

Аналогичные работы по совершенствованию открытого способа бурением скважин диаметром 4 м с выдачей продукта разрушения эрлифтом проводились в ОАО «Севералмаз». Как показали результаты, данный способ ввиду значительных затрат не может быть использован в условиях месторождения алмазов имени Ломоносова из-за высокой энергоемкости шарошечного разрушения и эрлифтного способа очистки забоя, причем энергоемкость растет прямо пропорционально квадрату диаметра скважины.

Наиболее реальным и конкурирующим вышеприведенным способам выемки является предложение по разработке малообъемных трубок одним высоким вертикальным уступом свыше 100 м с применением башенных подъемников, опирающихся на периодически углубляемое дно карьера [4]. Имеются и другие предложения по добыче кимберлита из подкарьерного пространства, например, скважинная гидродобыча. Однако ее применение в условиях многолетней мерзлоты затрудняется промерзанием во время остановок не только скважин, но и добычных подземных камер.

К вышесказанному можно добавить, что на сегодня для разработки малообъемных алмазных месторождений и подкарьерных запасов могут быть перспективными также способы, основанные на выемке керна большого диаметра с использованием буровых станков или других устройств типа геохода [5] или «подземного крота», изготовление которых может быть ускорено при условии модернизации горного машиностроения.

Способы выемки, предложенные ИГДС СО РАН

Для разработки малообъемных месторождений в ИГДС СО РАН предложены новые способы выемки полезных ископаемых, на которые получены патенты России. На рис. 1 приведены схемы реализации послойно-скважинного способа выемки (патент России №2090754). Для осуществления способа применяется метод комбинирования, к примеру, бульдозерной послойной отработки и бурошнековой выемки

(рис. 1, а). При этом бурят сплошным забоем скважину 1 диаметром 300–1000 мм устройством 2 для бурения скважин большого диаметра, после проходки 3–5 м бульдозер 3 послойно снимает разрыхленный кимберлит и подает его в устье скважины. Затем кимберлит поступает на забой расширяемой части скважины, откуда шнеком 4 направляют к забою пилот-долота 5 и подают его в загрузочные окна 6, а выдают наверх по центральному каналу двойной трубы. Наверху кимберлит направляют в бункер-питатель и на контейнер или на автосамосвал. При этом бурение прекращается за счет уменьшения осевого усилия, а скорость вращения снаряда устанавливается из условия подачи кимберлита в устье скважины и выдачи его наверх. При недостаточности проветривания в целях исключения загазованности могут применяться подземные электробульдозеры с рыхлителями. Если после рыхления не удастся достичь допустимой крупности, устанавливают небольшую дробилку и только после дробления подают кимберлит в скважину. Можно дробить и в скважине специальными устройствами. При послойной отработке полигон формируют с уклоном к устью скважины для облегчения транспортировки горной массы или даже вплоть до ее самотека, обеспечив условия для безопасной работы. При выемке крайне малых месторождений или проходке стволов шахт, шурфов и глубоких ям буровая установка может быть смонтирована в центре залежи на ферме (рис. 1, б). Причем, ввиду малого размера залежи, применяется малогабаритный электробульдозер, который движется по спиралеобразным траекториям.

При отработке залежи более крупного размера, когда установка фермы становится трудной инженерной задачей, возможно бурение скважин по контуру месторождения прямо по полезному ископаемому (рис. 1, в). Одновременное бурение нескольких скважин по контуру залежи и подача кимберлита к устьям скважин позволяют обрабатывать и более крупные месторождения. Однако при этом неизбежны потери из-за оставления целиков. Поэтому, если мощность буровой установки позволяет проходить скважины большого диаметра по крепким вмещающим породам, более рационально устанавливать буровую на более устойчивый породный массив (рис. 1, г). Достоинством этой схе-

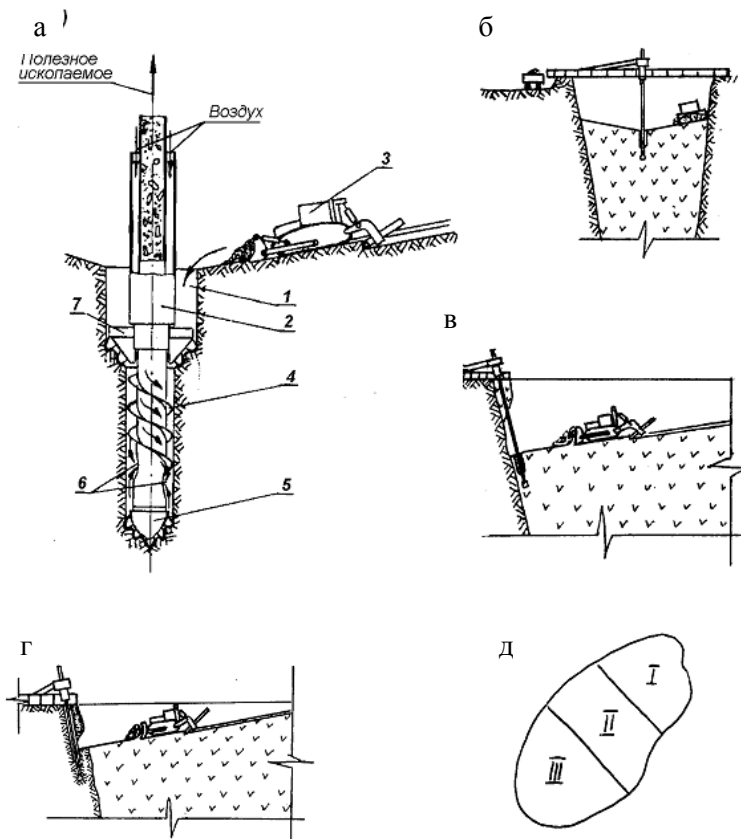


Рис. 1. Схема реализации послойно-скважинной технологии разработки малообъемных алмазных трубок

мы является возможность обрабатывать глубокие карьеры, не боясь потери устойчивости буровой колонны под действием осевого усилия. Однако при этом потребуются устанавливать по длине скважины специальные опоры под буровую колонну.

С целью выемки более крупных залежей с использованием естественного холода для замораживания бортов карьера, т.е. повышения их устойчивости, выемочное поле разбивают на отдельные участки (рис. 1, д). Выемку одного из этих участков ведут до его границ зимой, а летом закладывают и добавляют вяжущий состав по границе последующего обнажения для обеспечения устойчивости закладочного материала. Выемку следующего участка ведут тоже в холодное время года после схватывания вяжущего состава. Если естественные борта неустойчивы и в зимнее время, выемку можно проводить с одновременным креплением штангами или любым другим известным экономичным способом.

Спуск и подъем груза и оборудования осуществляется автомобильным или строительным краном, для подъема и спуска людей могут быть сооружены канатный или клетевой подъемник,

или лифт. В этом предложении требуется научная проработка рыхления и подачи кимберлита в скважину бульдозерами, или горными комбайнами, последующей его шнековой подачи в загрузочные окна наружной трубы и выдачи по внутренней трубе наверх.

По патенту №2465461 разработка малообъемных алмазных трубок решается путем бурения скважин большого диаметра кольцевым забоем, подрезкой обуренного цилиндрического столба породы, выдачей его наверх и последующей закладкой скважин пустой породой. Способ осуществляется следующим образом. После вскрыши месторождения на плоскости выемочного поля намечают правильные шестиугольники со сторонами, равными диаметру D выемочных скважин, а на вершинах и центре шестиугольников – соприкасающиеся круги 2 диаметром, равным D (рис. 2). На рис. 2 шестиугольник с кругами выделен как элемент сплошного покрытия выемочного поля. Затем в центре шестиугольника бурят вспомогательную скважину 3 на всю глубину залегания полезного ископаемого, последовательно выбуривают керн 4 из центральной выемочной скважины 5 диаметром D . Отрыв керна центральной скважины осуществляют из полости вспомогательной скважины механическим или гидравлическим способом, а керны внешних скважин отделяют из полости центральной скважины. Для этого гидравлическим, механическим или пескоструйным устройством 6 делают между плотиком и залежью систему трещин или прорезывают круговую щель 7, подрезающую намеченные керны и целики, образующиеся между двумя внешними кругами одного шестиугольника и одним кругом другого. Поднимая наверх устройство, прорезывают нужное количество щелей (рис. 3).

Вслед за этим для предупреждения искривления внешних скважин при их бурении и обвала стенок скважины в зоне трещиноватости, а также для обеспечения безопасности ведения работ центральную скважину заполняют самотвердеющей закладкой 8 (рис. 4). При этом самотвердеющую закладку применяют преимущественно по периметру скважин, а ее центральную часть заполняют пустой породой 9. Возможна льдопородная закладка. После этого выбуривают керны 10 из остальных шести внешних выемочных скважин 11 с центром на вершинах шестиугольников (рис. 4). При этом подъем керна не представляет трудностей, так как все керны заблаговременно подрезаны. Но так как после подрезки остается незначительный целик 12 (ножка керна), ограниченный контуром 13 внешних выемочных скважин 11 и контуром подрезных щелей 7, то срывать керн можно,

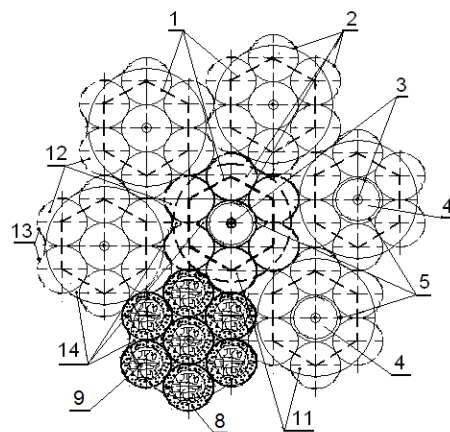


Рис. 2. Схема реализации новой технологии разработки малообъемных алмазных трубок

поднимая колонковую трубу с вращением. Простые расчеты, проведенные аналогично изложенным в [1], показывают, что для частичной подрезки межскважинных целиков 14 диаметр круговой щели 7 нужно принимать не более $2.4D$, а для полной подрезки целиков – не менее $2.6D$. В последнем случае максимальный диаметр круговой щели ограничивается необходимостью сохранения ножки 12 керна выемочных скважин. Необходимость оставления ножки вызывается тем, что при этом не только уменьшается объем разрушения при подрезке, но и обеспечивается устойчивость керна в конце цикла бурения.

Но уточнение диаметра отрезной щели явля-

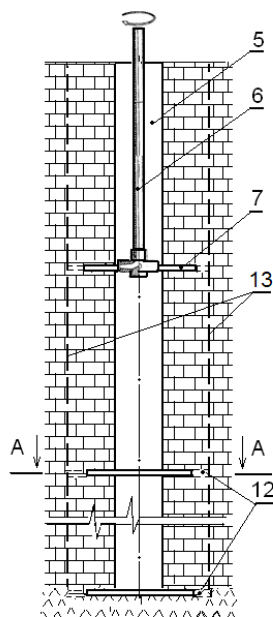


Рис. 3. Нарезание щелей в массиве залежи вокруг центральной скважины

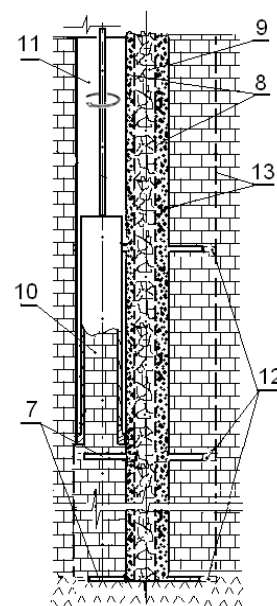


Рис. 4. Выбуривание керна на внешних выемочных скважин

ется вопросом разработки конкретного месторождения.

Достоинством предлагаемого способа при разработке алмазных месторождений является сохранность алмазов в объеме керна кимберлита. Кроме того, отделение керна от массива только от воздействия специальных устройств, размещенных во вспомогательной скважине, позволяет бурить скважины большого диаметра коронками с минимальной шириной ее торцовой части и, соответственно, значительно уменьшить нагрузку на забой. А это, в свою очередь, снижает потребную мощность и вес бурового станка и дает возможность бурить скважины диаметром до 2–3 м самоходными станками. Керны кимберлита можно разупрочнять и даже дезинтегрировать различными физико-химическими методами, циклами промораживания–оттаивания или гидравлическими способами. Как известно, все эти мероприятия являются кристаллосберегающими и при этом достаточно технологичны.

Отличительной особенностью вышеописанной технологии разработки является возможность ее совмещения с проведением геологоразведочных работ. Для этого на план буровых работ необходимо предварительно нанести схему разработки по новой технологии (рис. 2) и принять сетку разведочного бурения, кратной расстоянию между вспомогательными скважинами. В этом случае геологоразведочные скважины будут использованы при разработке месторождения. А если необходимо быстро разведать и отработать месторождение, разведку и разработку можно совместить, пробуравив вспомогательные скважины колонковым способом. Однако реализация такого общего подхода к освоению месторождения должна проводиться по единой методике проведения разведки–разработки.

Другой особенностью новой технологии является монолитность добываемого полезного ископаемого, что делает его удобным для выемки из полости скважины различными стреловыми самоходными кранами и транспортировки на склад или обоганительную фабрику без угрозы смерзания. Дробление таких негабаритов на обоганительной фабрике можно проводить гидравлическим способом (пат. РФ №2465460). В развитие вышеописанного способа выемки кимберлита предложен способ добычи алмазов, предусматривающий бурение скважин термомеханическим способом с применением ПАВ, последующее промораживание керна естественным холодом и его оттайку на обоганительной фабрике (патент РФ №2457329). При 1–2-кратном цикле промораживания–оттаивания кимберлита пористостью выше 3% наблюдается

его разупрочнение на 15–35% [6].

При выбуривании керна большого диаметра наибольшую трудность представляет отделение керна от массива, особенно когда оно проводится из полости вспомогательной скважины малого диаметра. Однако появление технологичного, производительного и экономичного способа отделения керна от массива из полости скважины малого диаметра позволит реализовать технологию бурения скважин по патенту РФ №2461712.

Заключение

Вышеприведенные технологические решения по нашему мнению обладают инновационной, экономической и социальной привлекательностью, заключающейся в следующем:

- вовлечение в хозяйственный оборот малообъемных месторождений, расположенных в отдаленных и малодоступных местах;
- возможность выемки подкарьерных запасов, которые нерентабельно добывать подземным способом;
- значительное уменьшение количества рабочих, занятых на добычных работах;
- резкое уменьшение объема отвалов, улучшение экологической обстановки;
- повышение уровня безопасности проведения добычных работ за счет реализации безлюдной выемки кимберлита.

Предложенные способы разработки предназначены для отработки малообъемных кимберлитовых месторождений и подкарьерных запасов, а также могут быть использованы для доработки подшахтных запасов. Однако область применения новых технологий гораздо шире. Они могут успешно применяться не только при добыче алмазов, но и при разработке месторождений других полезных ископаемых, имеющих трубко- или столбообразную форму малого поперечного сечения. Кроме того, технологию с бурением скважин сплошным забоем и послойной выемкой можно применять при проходке геологоразведочных шурфов, канав или в строительстве при проходке различных глубоких ям и котлованов.

Предложенная технология добычи выбуриванием керна большого диаметра при применении буровых станков или иных устройств, проходящих скважины диаметром более 4–6 м, и подрезке керна такого же диаметра может применяться как технология безлюдной разработки крупных алмазных и других месторождений полезных ископаемых.

Литература

1. Егоров Д.Е. Преимущества выбуривания цилиндрических изделий из камня на карьерах и способы

их отделения от массива горных пород [Текст] / Д.Е. Егоров // Записки Горного института. – 2006. – Т.167, ч. 1. – С. 10–12.

2. А.с. 857431 СССР, Класс E21B 25/00. Устройство для отделения керна [Текст] / В.В. Чубаров, В.В. Чуносков (СССР). – №2723301/22-03; заявл. 06.02.1979; опубл. 23.08.1981, бюл. №31. – 4 с.; ил.

3. Бородин А.А. О возможности выемки кимберлитовой руды вертикальными цилиндрическими выработками [Текст] / А.А. Бородин, Н.П. Бородин, А.А. Бородин // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы: сб. докл. Международ. научно-практ. конф. Мирный 1–9 июля 2001 г. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 339–345.

4. Точилин В.И. Энерго- и ресурсосберегающие

технологии разработки малых кимберлитовых трубок [Текст] / В.И. Точилин // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Международ. научно-практ. конф. Мирный, 11–15 апр. 2011г. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 559–563.

5. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок [Текст] / В.В. Аксенов. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. – 263 с.

6. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания–оттаивания на физико-механические свойства горных пород [Текст] / А.С. Курилко; отв. ред. В.А. Шерстов. – Якутск: ЯФГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 154 с.

Поступила в редакцию 07.10.2015

УДК 622.68

Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров

В.Л. Яковлев, Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

Приводятся результаты исследований в области развития карьерного транспорта. Приведены выявленные закономерности, а также сформулированы основные принципы и положения стратегии формирования транспортных систем карьеров. Установлено, что обоснование адаптивного характера развития транспортных систем карьеров, выявление закономерностей и ограничений их формирования, определение наиболее вероятного прогнозного фона наряду с методами прогнозирования и универсальной интерактивной моделью функционирования сложных транспортных систем карьеров составляют методическую основу долгосрочного и дальнесрочного прогнозов формирования транспортных систем карьеров. Определены перспективные направления исследований и приведены некоторые результаты в области теории карьерного транспорта.

Ключевые слова: транспортные системы карьеров, закономерности, принципы, стратегия формирования, адаптация, имитационное моделирование, прогноз.

Main Aspects of Forming and New Scientific Directions of Research of Open Pit Mining Transport Systems

V.L. Yakovlev, Yu. A. Bahturin, A.G. Zhuravlev

Institute of Mining UB RAS, Yekaterinburg

The article presents the results of the research in the field of open pit mining transport development. The revealed regularities are described and the basic principles and provisions of the strategy of open pit mining transport systems formation are formulated. It is established that the establishment of the adaptive nature of open-cast mines transport systems development, revealing of the regularities and constraints of their formation, determining of the most likely forecast background along with the methods of prediction and the universal interactive model of functioning of complex open pit mining transport systems constitute the methodological basis of long-term and overlong-term forecasts of formation these transport systems, which should be

ЯКОВЛЕВ Виктор Леонтьевич – член-корр. РАН, акад. АН РС(Я), советник РАН, г.н.с.; БАХТУРИН Юрий Алексеевич – к.т.н., зав. лаб.; ЖУРАВЛЕВ Артем Геннадьевич – к.т.н., с.н.с.

их отделения от массива горных пород [Текст] / Д.Е. Егоров // Записки Горного института. – 2006. – Т.167, ч. 1. – С. 10–12.

2. А.с. 857431 СССР, Класс E21B 25/00. Устройство для отделения керна [Текст] / В.В. Чубаров, В.В. Чуносков (СССР). – №2723301/22-03; заявл. 06.02.1979; опубл. 23.08.1981, бюл. №31. – 4 с.; ил.

3. Бородин А.А. О возможности выемки кимберлитовой руды вертикальными цилиндрическими выработками [Текст] / А.А. Бородин, Н.П. Бородин, А.А. Бородин // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы: сб. докл. Международ. научно-практ. конф. Мирный 1–9 июля 2001 г. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 339–345.

4. Точилин В.И. Энерго- и ресурсосберегающие

технологии разработки малых кимберлитовых трубок [Текст] / В.И. Точилин // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Международ. научно-практ. конф. Мирный, 11–15 апр. 2011г. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 559–563.

5. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок [Текст] / В.В. Аксенов. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. – 263 с.

6. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания–оттаивания на физико-механические свойства горных пород [Текст] / А.С. Курилко; отв. ред. В.А. Шерстов. – Якутск: ЯФГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 154 с.

Поступила в редакцию 07.10.2015

УДК 622.68

Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров

В.Л. Яковлев, Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

Приводятся результаты исследований в области развития карьерного транспорта. Приведены выявленные закономерности, а также сформулированы основные принципы и положения стратегии формирования транспортных систем карьеров. Установлено, что обоснование адаптивного характера развития транспортных систем карьеров, выявление закономерностей и ограничений их формирования, определение наиболее вероятного прогнозного фона наряду с методами прогнозирования и универсальной интерактивной моделью функционирования сложных транспортных систем карьеров составляют методическую основу долгосрочного и дальнесрочного прогнозов формирования транспортных систем карьеров. Определены перспективные направления исследований и приведены некоторые результаты в области теории карьерного транспорта.

Ключевые слова: транспортные системы карьеров, закономерности, принципы, стратегия формирования, адаптация, имитационное моделирование, прогноз.

Main Aspects of Forming and New Scientific Directions of Research of Open Pit Mining Transport Systems

V.L. Yakovlev, Yu. A. Bahturin, A.G. Zhuravlev

Institute of Mining UB RAS, Yekaterinburg

The article presents the results of the research in the field of open pit mining transport development. The revealed regularities are described and the basic principles and provisions of the strategy of open pit mining transport systems formation are formulated. It is established that the establishment of the adaptive nature of open-cast mines transport systems development, revealing of the regularities and constraints of their formation, determining of the most likely forecast background along with the methods of prediction and the universal interactive model of functioning of complex open pit mining transport systems constitute the methodological basis of long-term and overlong-term forecasts of formation these transport systems, which should be

ЯКОВЛЕВ Виктор Леонтьевич – член-корр. РАН, акад. АН РС(Я), советник РАН, г.н.с.; БАХТУРИН Юрий Алексеевич – к.т.н., зав. лаб.; ЖУРАВЛЕВ Артем Геннадьевич – к.т.н., с.н.с.

based on new researches, clarifying and developing the theory of open pit mining transport systems formation. Promising directions of research are defined and some results in the theory of open pit mining transport are presented.

Key words: open pit transport system, regularities, principles, strategy of formation, adaptation, simulation, forecast.

Введение

Транспортирование горной массы представляет один из основных и наиболее трудоемких процессов открытых горных работ. По мере роста глубины карьеров доля затрат на карьерный транспорт доходит до 55 и даже 70% в общих затратах на добычу полезного ископаемого. Транспортная составляющая оказывает значительное влияние на решение основных научных и проектных задач, а процесс транспортирования горной массы – основа открытой геотехнологии. В связи с этим одной из основных задач рационального природопользования и технологии экологически безопасной разработки месторождений является развитие и совершенствование карьерного транспорта. Особое место в рамках решения задачи занимают вопросы выявления особенностей и обоснования стратегии формирования горнотранспортных систем глубоких карьеров, эти вопросы традиционно исследуются Уральской школой карьерного транспорта, основателями которой являются Васильев М.В. и член-корр. РАН Яковлев В.Л. Выявлены закономерности изменения параметров транспортного процесса в динамике развития горных работ, разработаны методики определения технико-экономических показателей автомобильного, конвейерного, железнодорожного видов карьерного транспорта при их самостоятельном или комбинированном применении с учетом взаимосвязей со смежными процессами горного производства; обоснованы области эффективного применения различных видов карьерного транспорта, разработаны методы определения момента перехода от одних видов и схем транспорта к другим; обоснованы технологические требования на создание новой горнотранспортной техники, сформулированы основные принципы формирования транспортных систем глубоких карьеров и разработана методика выбора вида карьерного транспорта [1].

Закономерности формирования транспортных систем карьеров

Основная общая закономерность формирования транспортных систем карьеров для карьеров большой глубины и производительности заключается в одновременном применении нескольких видов транспорта, их комбинаций и переходе от одних схем транспортирования к другим. К числу общих закономерностей также отнесены следующие:

1. В целях уменьшения объемов горно-капитальных работ, а также вскрышных работ в первые периоды эксплуатации, их более равномерного распределения во времени при разработке глубоких карьеров в течение длительного времени с начала эксплуатации отсутствуют постоянные борты, поэтому транспортные коммуникации вынужденно создаются на временно нерабочих бортах; горные работы, как правило, ведутся поэтапно, в связи с чем при переходе от одного этапа к другому неизбежна перестройка внутрикарьерной части транспортной системы.

2. По мере развития карьера увеличиваются расстояния транспортирования и высота подъема горной массы, поэтому даже при сохранении годовых объемов добычи существенно возрастает трудоемкость ее транспортирования, вызывая необходимость пополнения парка транспортных средств, введения новых видов транспорта, перехода к комбинированным транспортным схемам.

3. Технический прогресс в развитии действующих и создании новых видов транспорта за длительный период эксплуатации карьера позволяет неоднократно менять оценку эффективности применения тех или иных видов карьерного транспорта и пересматривать области рационального их использования в конкретных горнотехнических условиях. Этому также способствуют неодинаковые для различных видов транспорта закономерности изменения технико-экономических показателей объемов перевозок, высоты подъема и дальности транспортирования.

4. Техническая, технологическая и экономическая оценки основных видов карьерного транспорта позволяют рекомендовать следующие предпочтительные условия их применения:

- по энергетическим затратам и экономическим показателям при грузопотоках более 15–20 млн. т и расстояниях транспортирования более 3–5 км наиболее эффективным является железнодорожный транспорт, поэтому в карьерах большой глубины и производительности его применение практически всегда целесообразно, при этом зона его использования по глубине должна быть по возможности максимальной и ограничиваться лишь условиями вписывания железнодорожных путей;

- наибольшую трудоемкость и энергоемкость во всем диапазоне глубины карьеров имеет ав-

томобильный транспорт, поэтому его самостоятельное применение эффективно в карьерах глубиной до 120–150 м и производительностью не более 15–20 млн т, в основном в схемах комбинированного транспорта в качестве сборочного звена при расстоянии перевозок до 1,5–2,5 км и высоте подъема не более 80–100 м;

– конвейерный транспорт конкурентоспособен в сравнении с железнодорожным для подъема горной массы (как правило, руды) с глубоких горизонтов, при этом на карьерах глубиной более 350–400 м при развитой сети коммуникаций железнодорожного транспорта в верхней зоне карьера для отработки глубинной части эффективными могут быть трехзвенные схемы комбинированного автомобильно-конвейерно-железнодорожного транспорта.

5. Рациональны две основные группы типовых схем последовательного формирования транспортных систем глубоких карьеров:

I группа – на основе автомобильного и крутонаклонных (конвейерного, скипового и др.) видов транспорта;

II группа – на основе железнодорожного и автомобильного транспорта, а в дальнейшем и крутонаклонного подъема, причем применение железнодорожного транспорта должно предусматриваться с первых лет эксплуатации карьера.

Основные принципы формирования транспортных систем карьеров

Основные принципы формирования транспортных систем глубоких карьеров представлены в таблице.

Основные принципы формирования транспортных систем глубоких карьеров и способы их учета

Принципы	Способ реализации
Оптимизация параметров транспортной системы карьера в течение всего срока разработки месторождения	Системный подход к оценке эффективности видов и схем транспорта. Поэтапная оптимизация на основе критериев эффективности. Учет динамики технико-экономических показателей
Обеспечение соответствия транспортной системы карьера изменяющимся горно-техническим условиям разработки месторождения	Дифференциация горно-технических условий разработки по глубине карьера. Учет изменения величины и направления грузопотоков горной массы.
Обеспечение единства функционирования технологических процессов добычи, транспортировки, переработки и складирования руд и пород	Учет взаимодействия отдельных видов транспорта между собой и с технологией смежных процессов. Обеспечение способности транспортной системы к адаптации

Основные положения общей стратегии формирования транспортных систем глубоких карьеров

Основные положения общей стратегии формирования транспортных систем глубоких карьеров сводятся к следующему:

1. Одновременное или последовательное применение двух или более видов транспорта в самостоятельном или комбинированном использовании является объективно неизбежным.

2. Как при проектировании нового глубокого карьера, так и при его реконструкции транспортная система для всех этапов разработки должна рассматриваться и приниматься с учетом ее развития до конца разработки месторождения.

3. Последовательность формирования транспортной системы карьера должна согласовываться с общей закономерностью развития горных работ, порядком разработки месторождения, развитием схемы вскрытия, формированием рабочей зоны и грузопотоков руды и вскрыши в течение всего срока службы карьера.

Сформулированные закономерности, основные принципы и положения общей стратегии формирования транспортных систем глубоких карьеров объективно отражают определенный период формирования транспортных систем карьеров в условиях плановой экономики, когда параметры экономической среды оставались практически неизменными, а технический и технологический уровень основных видов карьерного транспорта (автомобильного, конвейерного и железнодорожного) был примерно одинаков. Кроме того, экономическая оценка инвестиционных проектов производилась без учета дисконтирования затрат. В настоящее время используются утверждённые в 1994 г. Министрством экономики и финансов РФ, Госстроем и Госпромом России «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования», которые опираются на основные принципы и сложившиеся в мировой экономике подходы к оценке эффективности инвестиций. Практика применения «Методических рекомендаций...» для решения задач формирования транспортных систем выявила ряд негативных моментов. Применяемые при этом коэффициенты дисконтирования таковы, что при периоде оценки более 10–12 лет отдельные платежи оказывают незначительное влияние на величину интегральных критериев оценки и нивелируют различия в сравниваемых вариантах. Очевидно, что при рыночной экономике и прежние хорошо отработанные схемы формирования транспорт-

ных систем карьеров не могут быть в чистом виде перенесены в современные программы стратегического развития и требуют существенной корректировки. В частности, выявлены существенные отличия в развитии транспортных систем карьеров при плановой и рыночной экономике. Долгосрочный и дальнесрочный прогноз формирования транспортных систем карьеров должен быть основан на новых исследованиях, уточняющих и развивающих теорию формирования транспортных систем карьеров. Методическое обеспечение долго- и дальнесрочного прогноза формирования транспортных систем карьеров включает следующие этапы:

1. Установление факторов влияния прогноза.
2. Выявление основных закономерностей и тенденций формирования транспортных систем карьеров.
3. Определение основных параметров прогнозного фона, в частности, темпов роста цен на углеводородное сырье, ужесточения экологических требований к карьерному транспорту.
4. Разработка алгоритма сценариев развития ситуации по этапам.
5. Имитационно-статистическое моделирование функционирования транспортных систем карьеров. Выявление ограничений их развития.
6. Разработка способов верификации и корректировки прогноза.
7. Разработка алгоритма принятия решения по окончательному варианту сценария.

Решения сформулированной выше проблемы методического обеспечения прогноза формирования транспортных систем карьеров предлагается достичь при:

- прогнозе на основе количественного и качественного анализа тенденций и закономерностей их развития при адаптивном управлении, совершенствовании научно-методической базы и программного обеспечения моделирования функционирования транспортных систем карьеров;
- учете адаптивного характера развития транспортных систем карьеров, выявлении закономерностей и ограничений их формирования, определении наиболее вероятного прогнозного фона;
- использовании разработанных имитационных интерактивных моделей функционирования основных видов карьерного транспорта. Это позволяет «проиграть» варианты развития транспортных систем карьеров;
- вероятном прогнозном фоне с учетом макроэкономических показателей, в частности, цен на углеводородное сырье;
- обширном материале по формированию горнотранспортных систем, наработанным Уральской школой карьерного транспорта.

Перспективные направления исследований транспортных систем карьеров

Основные направления исследований в области карьерного транспорта:

1. Методическое обеспечение структурной и параметрической адаптации транспортных систем карьеров к изменению эндогенных и экзогенных условий, долгосрочного прогноза их развития.
2. Разработка и совершенствование имитационных моделей функционирования транспортных систем карьеров.
3. Обоснование сфер рационального применения различных видов транспорта, в том числе и специализированных для различных горнотехнических и горно-геологических условий.
4. Развитие теоретических основ технологий освоения месторождений «Интеллектуальное горное предприятие» (безлюдные технологии, оптимизирующие диспетчерские системы III поколения).
5. Разработка инновационных решений в технологическом транспорте и оптимизация технологических схем транспорта для создания природо- и ресурсосберегающих схем вскрытия месторождений.

Исследования по этим направлениям в ИГД УрО РАН проводятся на систематической основе [2–17]. Так, разработана универсальная интерактивная модель функционирования сложных транспортных систем карьеров, позволяющая с учетом вероятностного характера горнотранспортного процесса для различных горнотехнических условий и различных видов транспорта решать широкий круг задач [18–20]. Универсальность модели заключается в следующем:

- воспроизводит процесс транспортирования горной массы для всех основных видов карьерного транспорта (автомобильный, железнодорожный, конвейерный, автомобильно-конвейерный, автомобильно-железнодорожный, автомобильно-конвейерно-железнодорожный) как при их отдельном, так и параллельном применении. То есть моделируется функционирование любой из известных транспортных систем карьеров;
- может использоваться для решения широкого круга задач – например, от оперативного управления горнотранспортными комплексами, оценки влияния и выбора параметров горнотранспортного оборудования до долгосрочного прогнозирования параметров транспортных систем карьеров. Все зависит от полноты и точности исходных данных;
- может применяться для оптимизации

управления технологическими процессами горнотранспортных работ, в том числе для «подсказки» диспетчеру в режиме реального времени.

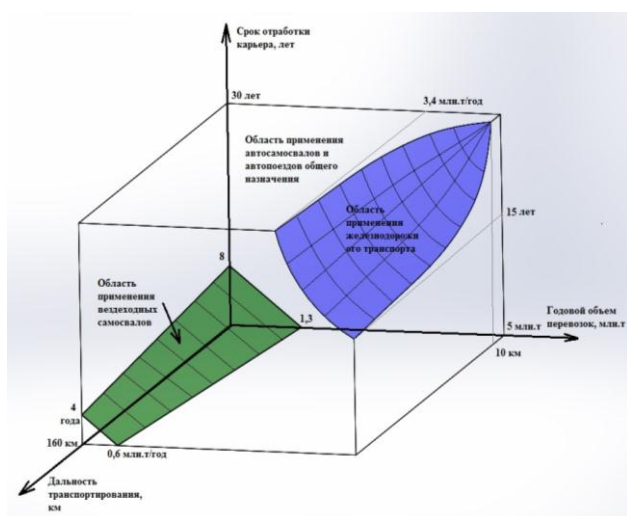
Моделирование осуществляется как в автоматическом режиме по заданным заранее принципам управления транспортным комплексом, так и в ручном режиме, когда интерактивно принимаются решения в любой момент времени. За счет интерактивности с применением модели можно «проигрывать» практически любые возможные варианты транспортирования горной массы в течение отчетного периода. Установлено, что учет адаптивного характера развития транспортных систем карьеров, выявление закономерностей и ограничений их формирования, определение наиболее вероятного прогнозного фона (с учетом динамики макроэкономических показателей) наряду с применением методов прогнозирования и универсальной интерактивной модели функционирования транспортных систем карьеров составляют методическую основу для достоверного долгосрочного прогноза формирования транспортных систем карьеров. Выявлены тенденции и закономерности формирования транспортных систем карьеров, обеспечивающих энергоэффективность и ресурсосбережение особых условий природопользования. Разработана методика обоснования областей применения магистральных видов транспорта горнодобывающих предприятий для доставки руды от удаленных малообъемных месторождений. Установлены области предпочтительного применения магистрального транспорта горнорудных предприятий для особых условий разработки кимберлитовых карьеров (рисунк).

Заключение

Таким образом, выявлены закономерности и сформулированы основные принципы и положения стратегии формирования транспортных систем карьеров. Установлено, что долгосрочный и дальнесрочный прогноз формирования транспортных систем карьеров должен быть основан на новых исследованиях, уточняющих и развивающих теорию формирования транспортных систем карьеров. Определены перспективные направления исследований и приведены некоторые результаты в области теории карьерного транспорта.

Литература

1. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Наука, 1989. – 240 с.
2. Технологические и организационно-экономические аспекты освоения минерально-сырьевых ресурсов Урала / С.В. Корнилов, В.Л. Яковлев // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сб. докладов Всерос. научно-техн. конф. с международ. участием, посв. 50-летию Горного института КНЦ РАН. – Апатиты; СПб., 2011. – С. 68–77.
3. О роли прогноза геологических, технологических и социально-экономических условий освоения месторождений в обеспечении устойчивого инновационного развития горного производства / В. Л. Яковлев // Проблемы и пути эффективной обработки алмазоносных месторождений: сб. докладов Международ. научно-практ. конф. Мирный, 2011 / Якутский проалмаз. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 73–79.
4. Современное состояние, проблемы и перспективы развития карьерного транспорта / В. Л. Яковлев, В. А. Яковлев // Проблемы карьерного транспорта: материалы XI Международ. научно-практ. конф. 12–14 окт. 2011 г. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2011. – С. 6–11.
5. Эволюция карьерного транспорта / В. Л. Яковлев, В.Ф. Столяров // Проблемы карьерного транспорта: материалы XI Международ. научно-практ. конф. 12–14 окт. 2011 г. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2011. – С. 182–186.
6. Генезис транспортных систем / В.Л. Яковлев, В.Ф. Столяров // Транспорт Урала. – 2008. – № 4. – С. 2–5.
7. Новая концепция развития горнотранспортных систем / В.Л. Яковлев, В.Ф. Столяров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12. – С. 242–249.
8. О роли научного прогноза технического прогресса и технологического развития в горной промышленности / В.Л. Яковлев // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. научных трудов. Вып. 4 / 94. / ИГД УрО. – Екатеринбург, 2008. – С. 144–147.
9. Состояние и перспективы развития карьерного



Области предпочтительного применения видов транспорта при транспортировке руды от удаленных малообъемных кимберлитовых месторождений

транспорта / В.Л. Яковлев // Горный информационно-аналитический бюллетень. Горные машины. – 2008. – Отд. прилож. № 8. – С. 9.

10. *Теория развития горнотранспортных систем*/ В.Л. Яковлев, А.В. Глебов, Ю.А. Бахтурин, В.Ф. Столяров //Проблемы карьерного транспорта: материалы IX Международ. научно-практ. конф. 9–12 окт. 2007 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 210–216.

11. *Технические и экономико-организационные аспекты разработки месторождений в сложных условиях эксплуатации* / В.Л. Яковлев, С. В. Корнилов // Горный журнал. – 2009. – № 5. – С. 75–78.

12. *Прогноз технологического развития в горнодобывающих отраслях на основе модернизации техники и технологии горного производства*/ А. И. Татаркин, С. В. Корнилов, В. Л. Яковлев, Е. А. Орлова //Экономика региона. – 2012. – № 4. – С. 80–92 (программа РАН № 34 «Прогноз потенциала инновационной индустриализации России»).

13. *Транспорт глубоких карьеров: состояние, проблемы, перспективы развития*/ В. Л. Яковлев // Глубокие карьеры: сб. докладов Всероссийской научно-техн. конф. с международ. участием. 18–22 июня 2012 г. / ГоИ КНЦ РАН. – Апатиты; СПб., 2012. – С. 67–80 (Доклад по программе ОНЗ -3 РАН (проект 12-Т-5-1021 УрО РАН) и программе президиума РАН № 34 (проект 12-П-5-1027 УрО РАН)).

14. *О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства* / К.Н. Трубецкой,

С.В. Корнилов, В.Л. Яковлев // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 15–19 (программа ОНЗ РАН «Прогноз технолог. развития в горнодоб. отраслях ...»).

15. *Бахтурин Ю.А.* Вопросы развития карьерного транспорта // Горно-информационный аналитический бюллетень. – 2008. Отд. прилож. №. 8. – С. 187–210.

16. *Бахтурин Ю.А., Кармаев Г.Д., Берсенева В.А.* Вопросы применения циклично-поточной технологии на карьерах // Горно-информационный аналитический бюллетень. –2011. – № 3. – С. 62–71.

17. *Бахтурин Ю.А.* Методическое обеспечение прогноза формирования транспортных систем карьеров // Горно-информационный аналитический бюллетень. – 2011. Отд. вып. № 11. – С. 294–308.

18. *Бахтурин Ю.А., Кармаев Г.Д., Берсенева В.А.* Вопросы интерпретации адаптационного формирования сложных транспортных систем карьеров // Горно-информационный аналитический бюллетень. – 2004. – №12. – С. 166–173.

19. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2012617844* Российская Федерация. Транспортная система карьера (ТСК) /Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев, Л.А. Трофименко (РФ). – 2012615505; заявл. 03.07.12; опубл. 30.08.12.

20. *Бахтурин Ю.А., Салахияев Р.Г., Дедюхин А.В., Журавлев А.Г.* Имитационное моделирование и автоматизированное управление горнотранспортными работами в карьерах // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 82–85.

Поступила в редакцию 17.06.2015

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Металлургия и материаловедение

УДК 678.06:62

Поверхностная модификация резин уплотнительного назначения

М.Д. Соколова^{*,**}, С.Н. Попов^{*}, М.Л. Давыдова^{*}, А.А. Дьяконов^{**}, Н.В. Шадринов^{*,**}

^{*}Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

^{**}Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

Приведены результаты модификации резин на основе различных каучуков с целью получения уплотнительных материалов с высокой морозо- и маслостойкостью. В качестве основного модификатора использован сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Установлено, что введение СВМПЭ в объем резиновой смеси В-14 на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 позволяет получить защитную пленку на поверхности вулканизированных образцов толщиной 70–80 мкм, что обеспечило повышение маслостойкости в 2,5 раза. Разработана технология нанесения защитной пленки из СВМПЭ толщиной до 2 мм на образцы из резин на основе каучуков БНКС-18, изопренового СКИ-3 и бутадиенового СКД-2, позволяющая повысить маслостойкость образцов в 3, 23 и 26 раз соответственно.

Ключевые слова: резина, уплотнения, поверхностная модификация, маслостойкость, морозостойкость, вулканизация.

Surface Modification of Sealing Appointment Rubbers

M.D. Sokolova^{*,**}, S.N. Popov^{*}, M.L. Davydova^{*}, A.A. Dyakonov^{**}, N.V. Shadrinov^{*,**}

^{*}Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk

^{**}North-Eastern Federal University, Yakutsk

The results of rubber modification based on various rubbers for sealing materials with high frost- and oil-resistance are presented. Ultra high molecular weight polyethylene UHMWPE is used as the main modifier. It is established, that introduction of UHMWPE in rubber blend V-14 based on butadiene nitrile rubber BNRS-18 allows to receive a protection film on the surface of cured samples with 70–80 mcm thickness, which provides of increase of oil resistance in 2.5 times. The coating technology of protection film from UHMWPE with the thickness up to 2 mm on the rubber samples based on BNRS-18, isoprene SRI-3 and butadiene SRD-2, which allowing to increase of oil resistance of the samples in 3, 23 and 26 times respectively is developed.

Key words: rubber, sealants, surface modification, oil resistance, frost resistance, curing.

***СОКОЛОВА Марина Дмитриевна – д.т.н., доцент, зав. лаб. ИПНГ СО РАН, проф. каф. ИЕН СВФУ, marsokol@mail.ru; *ПОПОВ Савва Николаевич – д.т.н., проф., зам. директора; *ДАВЫДОВА Мария Ларионовна – к.т.н., с.н.с.; **ДЯКОНОВ Афанасий Алексеевич – вед. инженер; ***ШАДРИНОВ Николай Викторович – к.т.н., с.н.с. ИПНГ СО РАН, вед. инженер УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов» АИЦ СВФУ.

Введение

Морозостойкость резин характеризуется, прежде всего, их способностью к сохранению уникального, отличающего этот материал от всех других материалов, свойства – высокоэластичности. Высокоэластичность – это способность материала к большим обратимым деформациям. Резины обладают высокоэластичностью благодаря высокой гибкости макромолекул каучука и сшитой структуре, которая образуется в процессе вулканизации. Именно это свойство делает резину уникальным герметизирующим материалом: практически 90% всех уплотнений – резиновые [1]. Однако при низких температурах высокоэластичность резины снижается и при определенной температуре (температуре стеклования, $T_{ст}$) полностью теряется, материал становится хрупким как стекло и разрушается при небольших нагрузках и деформациях. В табл. 1 приведены температуры стеклования различных каучуков [2]. Видно, что каучуки, в составе которых отсутствуют полярные группы, так называемые неполярные каучуки, имеют значительно более низкую температуру стеклования, чем бутадиен-нитрильные, имеющие в своем составе полярные акрилонитрильные звенья. Причем, чем выше содержание акрилонитрильных звеньев, тем хуже морозостойкость каучуков, что связано с понижением гибкости их макромолекул в связи с усилением внутри- и межмолекулярного взаимодействия в присутствии полярных групп.

Резины из неполярных каучуков применяются для изготовления шин, транспортных лент и других резино-технических изделий, которые эксплуатируются без контакта с углеводородными рабочими средами (масла, смазки). Они имеют достаточно высокую морозостойкость, удовлетворительную для эксплуатации в условиях Крайнего Севера РФ, где зимние температуры достигают минус 50 °С и ниже. Из полярных каучуков такой морозостойкостью обладает только бутадиен-нитрильный каучук СКН-18 с минимальным содержанием акрилонитрильных звеньев. Бутадиен-нитрильные каучуки являются основой отечественных маслостойких резин, т.к. в России промышленностью выпускается только этот вид полярных каучуков. В табл. 2 представлены физико-механические свойства резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков в зависимости от содержания полярных групп.

Сопоставляя данные табл. 1 и 2, видно, что с увеличением содержания акрилонитрильных групп в каучуке наблюдается повышение прочности и стойкости в углеводородных средах (табл. 2), но при этом значительно ухудшается морозостойкость (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Температуры стеклования каучуков [2]

Каучуки	$T_{ст}$, °С
Бутадиеновый каучук (СКД)	-110
Синтетический изопреновый каучук (СКИ)	-72
Натуральный каучук (НК)	-72
Бутадиен-стирольный каучук (СКС-10*)	-74
Бутадиен-нитрильный каучук СКН-18**	-53
Бутадиен-нитрильный каучук СКН-26**	-41
Бутадиен-нитрильный каучук СКН-40**	-27

*Число 10 – содержание стирольных групп, мас.%; **числа 18, 26, 40 – содержание акрилонитрильных групп, мас.%.

Т а б л и ц а 2

Физико-механические свойства бутадиен-нитрильных резин [3, с. 65]

Показатели	СКН-18	СКН-26	СКН-40
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	25	28	30
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	500	625	550
Степень набухания в смеси «бензин–бензол» в соотношении (3:1) в течение 24 ч, %	60–70	30–38	14–20

Целью данной работы является повышение маслостойкости резин на основе различных каучуков для обеспечения высокой работоспособности уплотнений машин и механизмов при их эксплуатации в углеводородных средах и воздействии низких температур, характерных для Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования

В качестве эластомерных матриц использованы: резиновая смесь промышленной марки В-14 на основе БНКС-18 (ОСТ 88 0.026.201-80); резиновая смесь на основе СКИ-3, изготовленная по стандартной для изопреновых каучуков рецептуре [3, с. 51]; резиновая смесь на основе СКД-2, изготовленная по стандартной для бутадиеновых каучуков рецептуре [3, с. 55].

В качестве модификатора резин использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) производства ООО «Томскнефтехим» и фирмы «Celanese GmbH» со средневязкостной молекулярной массой 3,9 млн и средним размером частиц 80 мкм. СВМПЭ, получаемый ионно-координационной полимеризацией этилена при низком давлении, относится к классу полиэтиленов низкого давления (ПЭНД). Увеличение молекулярной массы до 1 млн и более резко меняет многие свойства ПЭНД, поэтому СВМПЭ относят не к одной из марок ПЭНД, а к особому типу материала. Выбор СВМПЭ обусловлен тем, что в отличие от полиэтиленов других марок он имеет более высокие износ-, агрессивностойкость, ис-

ключительную водостойкость и способность сохранять прочностные характеристики при низких температурах (до -180°C) [4,5]. Эти свойства делают СВМПЭ весьма перспективным для применения его в качестве защитных покрытий различных деталей и конструкций.

Образцы из резины на основе БНКС-18 изготавливались путем смешения на лопастном смесителе СВМПЭ с нанонаполнителями (УДАГ и шпинелью магния), затем эту композицию вводили на вальцах в объем резиновой смеси В-14 и затем вулканизовали в вулканизационном прессе при 155°C в течение 25 мин. Полученные таким образом материалы названы полимерэластомерными композитами. Нанонаполнители, имеющие высокую поверхностную активность за счет размеров частиц в нанодиапазоне, применяли для улучшения взаимодействия на границе раздела полимерных фаз.

УДАГ (наноуглерод) – сложный и неоднородный продукт, имеет слоистое строение, размеры частиц от 4 до 6 нм, химический состав: кубический алмаз – 30%, графит и аморфный углерод – 58%, твердые оксиды и карбиды – 6%, влага – 3%, газовые примеси (N_2 , CO_2 , N_2O , NO , O_2 , CO) – 3%.

Шпинель магния – нанонаполнитель сложного состава с общей формулой $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, представляющий собой тугоплавкий твердый раствор внедрения, размеры частиц от 40 до 70 нм.

Нанесение покрытий в виде пленки СВМПЭ толщиной 1–1,5 мм проводили следующим образом: резиновые смеси на основе БНКС-18, СКИ-3 и СКД-2 наполняли 10 % мас. СВМПЭ, на вальцах формировали пластины толщиной 1–1,5 мм, дублировали их на прессе с пленкой СВМПЭ и затем вулканизовали при 155°C в течение 30 мин.

Упругопрочностные свойства при растяжении определяли по ГОСТ 270-75, стойкость к углеводородным средам – по ГОСТ 9.030-74, коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия – по ГОСТ 13808-79.

Исследования структуры модифицированных резин проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-6460 LV «JEOL».

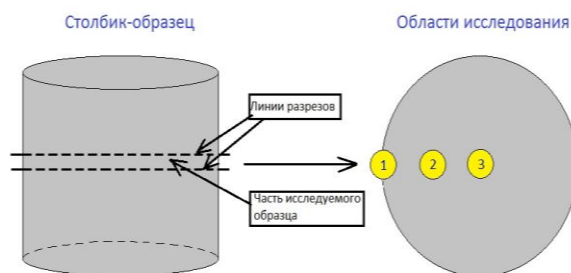


Рис. 1. Схема областей исследования распределения частиц СВМПЭ в образцах

Распределение СВМПЭ в образцах изучали методом оптической микроскопии на Olympus BX-41 (Япония). На рис. 1 приведена схема зон исследования образцов (диаметр 10 мм, высота 10 мм).

Для оценки силы адгезии между резиной и покрытием из СВМПЭ использовался «Метод определения прочности связи между слоями при расслоении» по ГОСТ 6768-75.

Результаты и обсуждение

Исследования основных свойств композитов на основе БНКС-18, СВМПЭ показали эффективность применения нанонаполнителей. Физико-механические характеристики, морозо-, маслостойкие свойства композитов с УДАГ и шпинелью магния имеют лучшие показатели, чем композиции без них (табл. 3). Таким образом, выявлен структурный эффект модификации, заключающийся в образовании развитого переходного слоя на границе раздела полимерных фаз в присутствии нанонаполнителей, описанный в работах [6,7].

На рис. 2 приведены микрофотографии поверхностного слоя резин, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии. Видно, что введение СВМПЭ в каучуковую матрицу привело к его скоплению на поверхности образцов таким образом, что образуется защитная полимерная пленка толщиной порядка 70–80 мкм и реализуется поверхностный эффект модификации.

Анализ распределения частиц СВМПЭ по размерам в различных областях образца (рис. 1) показал, что размеры частиц СВМПЭ в вулканизированных полимерэластомерных образцах составляют в среднем в 1-й области – 43 мкм, 2-й – 36 мкм, в 3-й – 34 мкм. Это значительно меньше,

Таблица 3

Основные эксплуатационные характеристики полимерэластомерных композитов

Материал	f_{100} , МПа	f_p , МПа	ϵ_p , %	Q, % масло И-50А	K_m -45°C
В-14	4,7	11,6	215	5,27	0,644
В-14+10% СВМПЭ	7,0	10,3	180	2,93	0,564
В-14+10% (СВМПЭ + 2% УДАГ)	7,8	12,8	253	2,08	0,754
В-14+10% (СВМПЭ + 2% шпинели магния)	7,5	12,1	223	2,18	0,718

Примечание. f_{100} – условное напряжение при 100% удлинении; f_p – условная прочность при растяжении; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; Q – степень набухания в среде масла И-50А; K_m -45°C – коэффициент морозостойкости при температуре -45°C

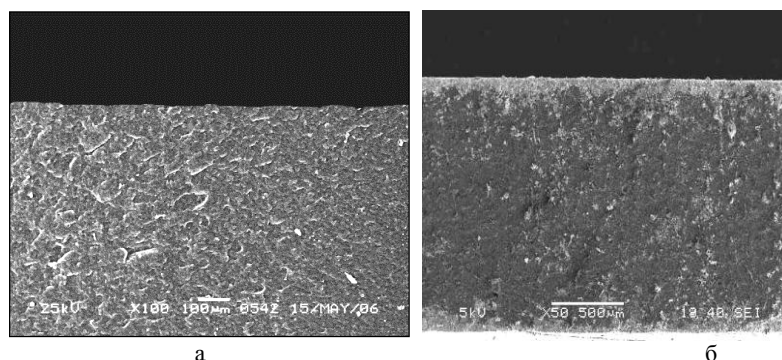


Рис. 2. Электронные микрофотографии поверхностных слоев образцов из резины В-14 (а) и композита В-14+10%(СВМПЭ+2% шпинели магния) (б). Увеличение x100 (а); x50 (б)

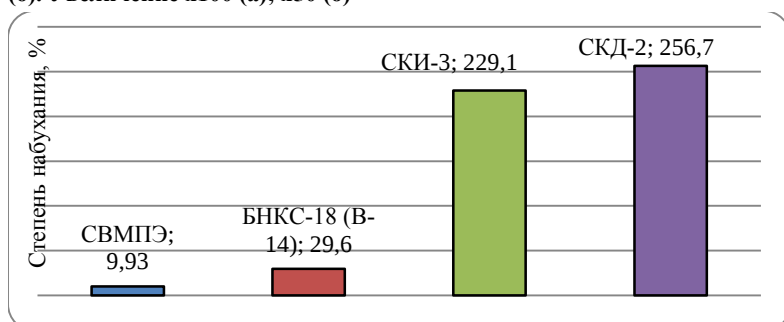


Рис. 3. Степень набухания СВМПЭ и резин на основе различных каучуков в среде стандартной (ASTM D471) углеводородной жидкости IRM 903

чем в исходном порошке, размер частиц в котором порядка 80 мкм. По всей вероятности, в процессе вулканизации образцов происходит подплавление частиц СВМПЭ, т.к. температура вулканизации (155°C) несколько выше температуры плавления СВМПЭ (145–150°C). Кроме того, исследования показали, что размер частиц СВМПЭ в эластомерной матрице повышается от середины образца к его поверхности. Предполагается, что при вулканизации частицы менее плотного СВМПЭ в условиях объемного сжатия мигрируют на поверхность и способствуют образованию полиэтиленовой пленки на поверхности.

Видно, что размеры частиц СВМПЭ в полимерэластомерных образцах меньше, чем в исходном порошке. Это можно объяснить тем, что температуры вулканизации (155°C) несколько выше температуры плавления СВМПЭ (145–150°C), поэтому в процессе изготовления образцов происходит частичное подплавление СВМПЭ, что приводит к уменьшению размеров его частиц. Размер частиц СВМПЭ в эластомерной матрице повышается от середины образца к его поверхности. Предполагается, что при вулканизации частицы менее плотного СВМПЭ в условиях объемного сжатия мигрируют на поверхность и способствуют образованию полиэтиленовой пленки на поверхности. Таким образом, поверхностная

модификация резин на основе БНКС-18 возможна при объемном введении СВМПЭ. Однако, несмотря на то, что резины на основе БНКС-18 по сравнению с резинами на основе неполярных каучуков СКИ-3 и СКД-2 обладают высокой стойкостью в маслах (рис. 3), имеют высокую температуру стеклования (табл. 1) и, соответственно, более низкую морозостойкость.

Поэтому следующий этап исследований заключался в разработке технологии нанесения пленки из СВМПЭ со значительно большей толщиной. Это, безусловно, может создать надежную защиту резин на основе неполярных каучуков СКИ-3 и СКД-2 и дать возможность их применения в производстве более морозостойких уплотнений по сравнению с уплотнениями из резин на основе БНКС-18 и в то же время имеющих высокую стойкость в рабочих средах масел и смазок. Стойкость к рабочим средам будет определяться степенью набухания в них СВМПЭ, которая меньше в 23 раза по сравнению с резинами на основе СКИ-3 и в 26 раз по сравнению с резинами из СКД-2 (рис. 3). В случае резин на основе полярного каучука БНКС-18 такое покрытие необходимо в подвижных уплотнениях, если в них происходит значительный износ в результате агрессивного абразивного истирания, который проявляется во многих узлах трения.

Однако основным показателем надежной работы таких изделий является обеспечение прочной связи покрытия с основой (подложкой). В данной работе эта проблема решена путем введения в объем эластомерной матрицы СВМПЭ, который служит также материалом покрытия. Причиной значительного повышения прочности связи между слоями (табл. 4) является высокое сцепление однородных макромолекул СВМПЭ на границе раздела слоев.

Таблица 4

Прочность связи между слоями резиновой основы и покрытия из СВМПЭ

Состав эластомерной основы	Прочность связи между слоями при расслоении, Н
БНКС-18 (В-14)	36
БНКС-18 + СВМПЭ	51
СКИ-3	160
СКИ-3 + СВМПЭ	189
СКД-2	150
СКД-2 + СВМПЭ	186

Заключение

Таким образом, показана высокая эффективность применения покрытий из морозо-, агрессивостойкого СВМПЭ на поверхности резиновых изделий из-за значительного повышения их стойкости при воздействии углеводородных сред. Для получения таких пленок на поверхности резин из полярного бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 модифицирующую добавку СВМПЭ можно вводить только в объем резиновой смеси. Пленка толщиной 70–80 мкм в данном случае будет формироваться за счет миграции СВМПЭ к поверхности образца в процессе вулканизации. Этот способ технологически более простой по сравнению с другим способом, использованным в данном исследовании, благодаря которому на поверхности резиновых изделий удалось получить пленку из СВМПЭ толщиной до 2 мм. При этом для обеспечения повышенной прочности связи между слоями СВМПЭ и эластомерной матрицей в последнюю вводили небольшое количество порошка СВМПЭ. Однако, несмотря на усложнение технологии, этот способ показал также высокую эффективность за счет возможности применения в качестве эластической составляющей уплотнений резин на основе неполярных изопреновых и бутадиеновых каучуков, обладающих более высокой морозо-

стойкостью по сравнению с резинами на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18.

Литература

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник /Под ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине: Справ. изд. – М.: Химия, 1989. – 400 с.
3. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: НППА «Истек», 2009. – 504 с.
4. Kurtz Steven M. UHMWPE Biomaterials Handbook. Elsevier Science, 2009. – 543 p.
5. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. и др. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. – Л.: Химия, 1982. – 80 с.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // International Polymer Science and Technology. – 2011. – V. 38, №5. – P. 25–29.
7. Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Okhlopkova A.A. et al. Enhancement of compatibility between ultrahigh-Molecular-Weight polyethylene particles and butadiene-Nitrile rubber matrix with nanoscale ceramic particles and characterization of evolving layer // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2013. – Vol. 34, № 12. – P. 3762–3766.

Поступила в редакцию 17.09.2015

УДК 678.026.3

Разработка и исследование комбинированных базальтопластиковых стержней

А.А. Кычкин, А.К. Кычкин, А.Г. Туисов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Физико-механические характеристики конструкционных пластиков на основе непрерывных базальтовых волокон делают их перспективным материалом для различных отраслей промышленности. Обладая малым весом и высокой коррозионной стойкостью, они обеспечивают прочность на разрыв вдоль направления оси армирования выше, чем большинство конструкционных сталей, уступая им, однако, по величине модуля упругости. Поэтому основной задачей в настоящее время является повышение данного показателя. Объектом исследования выбраны экспериментальные образцы комбинированных базальтопластиковых стержней различных типов диаметром Ø8 мм, полученные методом протяжки базальтового волокна, армированного металлической проволокой диаметром 4 мм марки ВР-1 (ГОСТ 6727-80), методом протяжки базальтового волокна, армированного углеродным волокном Rapex 35, и методом скручивания в винтовую форму отдельных однонаправленных базальтовых ровингов. В качестве матрицы при получении экспериментальных образцов комбинированных базальтопластиковых стержней было использовано хорошо зарекомендовавшее трехкомпонентное эпоксигидридное связующее. Проведенные экспериментальные физико-механические исследования показали,

КЫЧКИН Айсен Анатольевич – аспирант, icen.kychkin@mail.ru; КЫЧКИН Анатолий Константинович – к.т.н., в.н.с., kychkinplasma@mail.ru; ТУИСОВ Алексей Геннадьевич – к.т.н., с.н.с., tagg@rambler.ru.

Заключение

Таким образом, показана высокая эффективность применения покрытий из морозо-, агрессивостойкого СВМПЭ на поверхности резиновых изделий из-за значительного повышения их стойкости при воздействии углеводородных сред. Для получения таких пленок на поверхности резин из полярного бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18 модифицирующую добавку СВМПЭ можно вводить только в объем резиновой смеси. Пленка толщиной 70–80 мкм в данном случае будет формироваться за счет миграции СВМПЭ к поверхности образца в процессе вулканизации. Этот способ технологически более простой по сравнению с другим способом, использованным в данном исследовании, благодаря которому на поверхности резиновых изделий удалось получить пленку из СВМПЭ толщиной до 2 мм. При этом для обеспечения повышенной прочности связи между слоями СВМПЭ и эластомерной матрицей в последнюю вводили небольшое количество порошка СВМПЭ. Однако, несмотря на усложнение технологии, этот способ показал также высокую эффективность за счет возможности применения в качестве эластической составляющей уплотнений резин на основе неполярных изопреновых и бутадиеновых каучуков, обладающих более высокой морозо-

стойкостью по сравнению с резинами на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18.

Литература

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Под ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине: Справ. изд. – М.: Химия, 1989. – 400 с.
3. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: НППА «Истек», 2009. – 504 с.
4. Kurtz Steven M. UHMWPE Biomaterials Handbook. Elsevier Science, 2009. – 543 p.
5. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. и др. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. – Л.: Химия, 1982. – 80 с.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // International Polymer Science and Technology. – 2011. – V. 38, №5. – P. 25–29.
7. Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Okhlopkova A.A. et al. Enhancement of compatibility between ultrahigh-Molecular-Weight polyethylene particles and butadiene-Nitrile rubber matrix with nanoscale ceramic particles and characterization of evolving layer // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2013. – Vol. 34, № 12. – P. 3762–3766.

Поступила в редакцию 17.09.2015

УДК 678.026.3

Разработка и исследование комбинированных базальтопластиковых стержней

А.А. Кычкин, А.К. Кычкин, А.Г. Туисов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Физико-механические характеристики конструкционных пластиков на основе непрерывных базальтовых волокон делают их перспективным материалом для различных отраслей промышленности. Обладая малым весом и высокой коррозионной стойкостью, они обеспечивают прочность на разрыв вдоль направления оси армирования выше, чем большинство конструкционных сталей, уступая им, однако, по величине модуля упругости. Поэтому основной задачей в настоящее время является повышение данного показателя. Объектом исследования выбраны экспериментальные образцы комбинированных базальтопластиковых стержней различных типов диаметром Ø8 мм, полученные методом протяжки базальтового волокна, армированного металлической проволокой диаметром 4 мм марки ВР-1 (ГОСТ 6727-80), методом протяжки базальтового волокна, армированного углеродным волокном Rapex 35, и методом скручивания в винтовую форму отдельных однонаправленных базальтовых ровингов. В качестве матрицы при получении экспериментальных образцов комбинированных базальтопластиковых стержней было использовано хорошо зарекомендовавшее трехкомпонентное эпоксигидридное связующее. Проведенные экспериментальные физико-механические исследования показали,

КЫЧКИН Айсен Анатольевич – аспирант, icen.kychkin@mail.ru; КЫЧКИН Анатолий Константинович – к.т.н., в.н.с., kychkinplasma@mail.ru; ТУИСОВ Алексей Геннадьевич – к.т.н., с.н.с., tagg@rambler.ru.

что объемное содержание углеродного волокна 25% приводит к возрастанию предела прочности при растяжении на 29 %, а модуля упругости при растяжении на 90%. Предел прочности при статическом изгибе при этом возрастает на 50%. Выявлено, что разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит хрупкий характер с расслоением.

Ключевые слова: базальтопластик, углеродное волокно, испытания на разрыв, модуль упругости, предел прочности, скрученно-винтовая композиционная арматура, хрупкое разрушение.

Research and Development of Combined Basalt Rods

A.A. Kychkin, A.K. Kychkin, A.G. Tuisov

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Physical and mechanical characteristics of engineering continuous basalt fiber plastics make them a promising material for various industries. Due to low weight and high corrosion resistance, these plastics provide the axis tensile strength along higher than most structural steels. However, the magnitude of the modulus of elasticity is still significantly lower. Therefore, the main research task now is an increasing the Young's modulus of basalt fibers plastics. The objects of the study were selected experimental samples of combined basalt rods of various types with the diameter Ø8 mm, which were produced by the longitudinal and transverse winding of basalt fiber to a metal wire, combined with carbon portage and twisted in a spiral shape of individual unidirectional basalt rovings, impregnated and cured with 3-component epoxy-anhydride binder. A metal rod with a diameter of 4 mm brand BP-1 was used as the reinforcement material for basalt rod Ø8 mm, obtained by longitudinal-transverse winding. In the samples with a carbon fiber of reinforcing material was used Zoltek Carbon fiber with volume content of 25% in the composite. Experimental studies of physical-mechanical properties have shown that the 25% volume content of carbon fiber leads to the 29% increase of the limit of the tensile strength, and 90% growth of tension elasticity modulus. The ultimate strength in static bending is increased by 50%. It is revealed also that the destruction of the unidirectional composite rods is fragile with the bundle.

Key words: basalt, carbon fiber, metal wire, spun-helical composite frame, corrosion resistance, tensile strength, modulus of elasticity.

Введение

Конструкционные пластики на основе непрерывных базальтовых волокон обладают высоким уровнем физико-механических характеристик вдоль направления оси армирования (превышающим прочность большинства конструкционных сталей), низким коэффициентом теплопроводности, относительно высокой диэлектрической проницаемостью, очень малым (по сравнению со сталями и высокопрочными материалами) удельным весом. Но, несмотря на все, промышленности требуются конструкционные пластики все с более высокими физико-механическими характеристиками. Основные преимущества композитных материалов – это их малый вес и коррозионностойкость. Но стоит отметить, что применение базальтопластиков в качестве материалов конструкционного назначения, армирование в бетонных конструкциях ограничено вследствие низких значений модуля упругости при растяжении.

Ухудшение железобетонных структур из-за коррозии стального армирования – известный

зарегистрированный факт. Главные компоненты бетона – цементный, (например, песок) и грубые в виде гравия или сокрушенного камня. Когда они смешаны с водой, цемент реагирует химически с водой, названной гидратацией, и формирует твердое конкретное соединение. Рецепты различных бетонных марок варьируются, но у большинства есть составы (в объемном условии) в диапазоне приблизительно: цементный порошок на 7–15%, вода на 15–20%, воздух на 0,5–8%, мелкие заполнители на 25–30% и грубые совокупности на 30–50%. Всегда было известно, что бетон – пористый материал, свойства которого зависят от его порового пространства. Есть много различных видов пор в бетоне, которые привлекаются при процессе смешивания. У простого бетона есть два главных недостатка: низкий уровень силы растяжения и низкое напряжение в переломе. Предел прочности у бетона имеет очень низкие показатели, обуславливающиеся содержанием многочисленных микротрещин. Быстрое распространение этих микротрещин под

прикладываемым напряжением отвечает за низкий предел прочности материала. Эти недостатки привели к значительным исследованиям, нацеленным на развитие новых подходов для изменения хрупких свойств бетона [1].

Различными исследователями ведутся работы по разработке комбинированных стержней из базальта для использования основного преимущества композитных материалов – их коррозионостойкость. Китайскими и японскими исследователями велись работы по разработке базальтовых стержней с металлическим сердечником [2].

В данной статье представлены результаты исследований физико-механических свойств различных типов комбинированных базальтопластиковых стержней.

Материалы и методы исследования

Для изготовления опытных образцов базальтопластиковых стержней применяли эпоксидное связующее по рецептуре, согласно РТП-СП2-20994511-1999Т, основу которого составляет эпоксидиановая смола ЭД-22, отверждаемая изометилтетрагидрофталевым ангидридом (изо-МТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-трис (диметиламинометил) фенола (УП-606/2). Основной армирующий наполнитель – базальтовый ровинг РБН 13-2400-4С производства ООО «ТБМ» (г. Якутск). Физико-механические показатели данного ровинга отображены в табл. 1.

В качестве дополнительно армирующих наполнителей использовали высокопрочную металлическую проволоку ВР-1 диаметром 4 мм (ГОСТ 6727-80) и углеродный ровинг Panex 35 производства Zoltek (США). Физико-механические свойства данного ровинга показаны в табл. 2.

Определения физико-механических свойств полученных образцов базальто- и стеклопластика проводили методом растяжения на испытательной машине «Zwick Roel Z600», тип ВРС-F0600TN.R09, серийный номер 160088-2008

Т а б л и ц а 1

Физико-химические свойства базальтового ровинга

Показатели	РБН 13-2400-4С
Номинальная линейная плотность ровинга с допускаемым отклонением по линейной плотности от номинальной, текс	2400±60
Диаметр элементарного волокна, мк	13
Разрывная нагрузка, мН/текс, не менее	320
Массовая доля веществ, удаляемых при прокаливании, %, не менее	0,3
Массовая доля влаги, %, не более	1,0

Т а б л и ц а 2

Физико-химические свойства углеродного ровинга

Показатели	Panex 35
Номинальная линейная плотность ровинга с допускаемым отклонением по линейной плотности от номинальной, текс	3600±120
Диаметр элементарного волокна, мк	7,2
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	4,137
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее	242
Концентрация Carbon, %	95

(ГОСТ 12004-81) на базе ЦКП ИФТПС СО РАН в соответствии с ГОСТ 32656-2014 «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение» (ISO 527-4:1997,MOD), (ISO 527-5:2009, MOD).

Экспериментальная часть

Опытные образцы базальтопластиковых стержней были изготовлены на технологической линии «Струна А». Формование и отверждение базальтопластиковых стержней периодической формы номинальным диаметром 8 мм осуществлялось протяжкой со скоростью 2–160°С, температура выдержки до полного отверждения составляла 160±2°С в течение 4 ч (согласно рис. 1). Для качественной оценки результатов были также изготовлены базальтопластиковые стержни диаметром 8 мм без добавления дополнительно армирующих компонентов (проволока ВР-1, углеродный ровинг Panex 35). Содержание эпоксидного связующего во всех отвержденных базальтопластиковых образцах составило 18±0,5% от массы стержня.

Экспериментальные образцы скрученно-винтовой композитной арматуры были получены так же, как формование и отверждение со скоростью 2–160°С, с последующей выдержкой до полного отверждения при температуре 160±2°С в течение 4 ч (согласно рис.2).

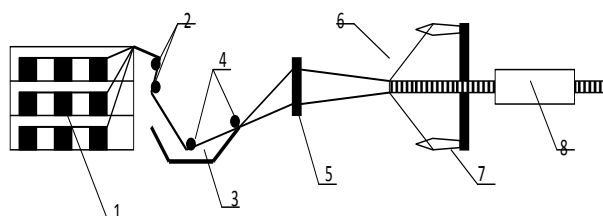


Рис. 1. Технологическая схема линии по формованию базальтопластиковых стержней:

1 – шпулярник; 2 – подогреваемые металлические стержни; 3 – ванна пропитки; 4 – отжимные валики; 5 – раскладочное кольцо; 6 – формующая фильера; 7 – вертлюг-укладчик кольцевых нитей; 8 – печь полимеризации

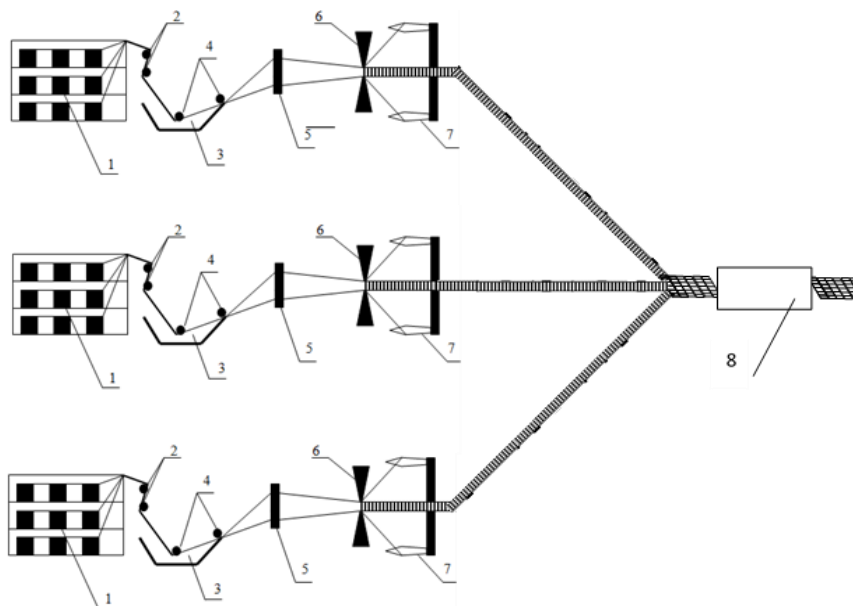


Рис. 2. Технологическая схема линии по формированию базальтопластиковых стержней методом скручивания в винтовую форму.

Усл. обозначения те же, что на рис. 1



Рис. 4. Нагружение образцов на растяжение

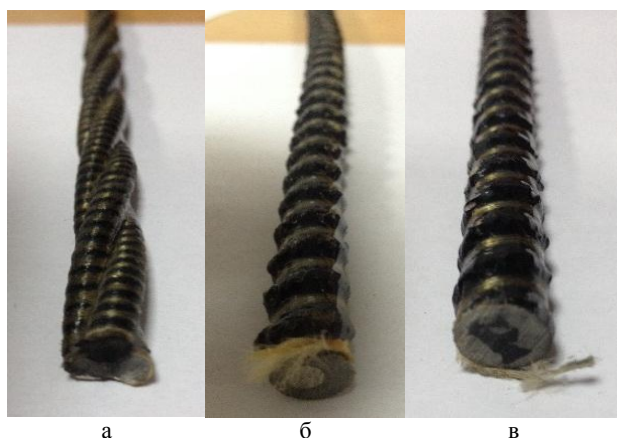


Рис. 3. Образцы арматур: а – скрученная в винтовую форму; б – со стальным сердечником; в – с сердечником из углеродного волокна

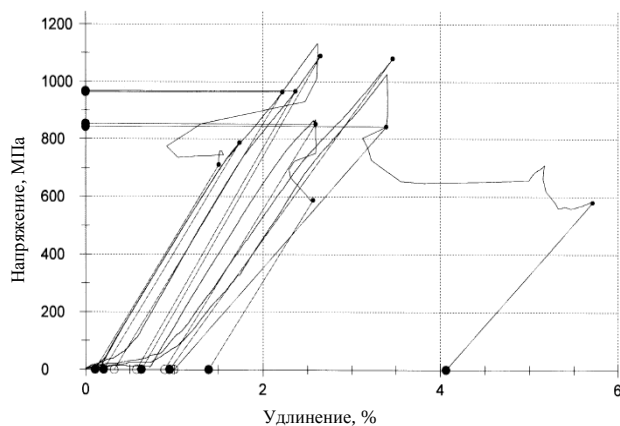


Рис. 5. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля без добавления углеродного волокна

На рис.3. представлены образцы испытываемых стержней.

На рис. 4 представлен общий вид нагружения образцов на растяжение, на рис.5–8 – основные результаты испытаний. Данные на рис.5, 8 свидетельствуют о снижении значения предела прочности и модуля упругости при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы – от 995 до 685 МПа и от 50 до 45 ГПа соответственно.

Из рис. 5–7 видно, что образцы, армированные углеродным волокном, имеют более высокие значения предела прочности и модуля упругости при растяжении, а именно, установлено увеличение предела прочности с 995 до 1290 МПа, модуля

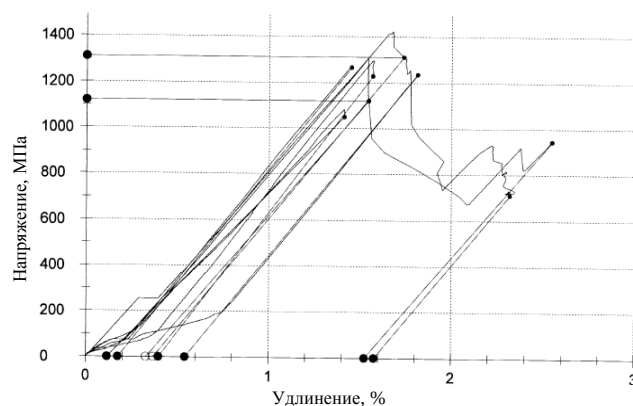


Рис. 6. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля с добавлением углеродного волокна в количестве 25 % по объемному содержанию

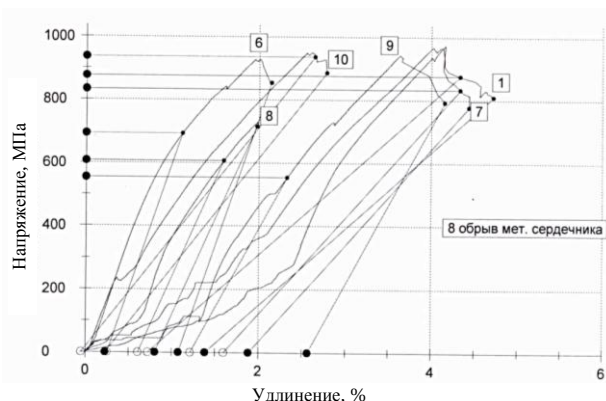


Рис.7. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня периодического профиля с добавлением металлической проволоки 4 ВР-1 (ГОСТ 6727-80)

упругости с 50 до 95 ГПа для образцов базальтопластика, состоящих на 25% (по объему) из углеродного волокна, образцы, армированные металлической проволокой 4 ВР-1 – более низкие значения предела прочности и модуля упругости при растяжении, а именно, установлено снижение предела прочности с 995 до 915 МПа, модуля упругости с 50 до 40 ГПа для образцов базальтопластика.

Разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит ярко выраженный хрупкий характер. Оно наступает внезапно и характеризуется чередующимся разрывом волокон в разных, наиболее слабых сечениях и расслоением материала, о чем свидетельствует рис.9. Причиной расслоения являются касательные напряжения, возникающие в местах разрыва волокон.

Заключение

На основании полученных экспериментальных прочностных исследований следует, что армирование базальтопластиковых стержней периодического профиля приводит к существенному увеличению прочностных показателей базальтопластика.

Проведенные экспериментальные физико-механические исследования показали, что содержание углеродного волокна (25% по объемному содержанию) приводит к возрастанию предела прочности при растяжении на 29 % (с 995 до 1290 МПа), модуля упругости при растяжении на 90% (с 50 до 95 ГПа).

Установлено снижение значения предела прочности и модуля упругости при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы – от 995 до 685 МПа и от 50 до 45 ГПа, соответственно.

Разрушение однонаправленных базальтопластиковых стержней носит ярко выраженный

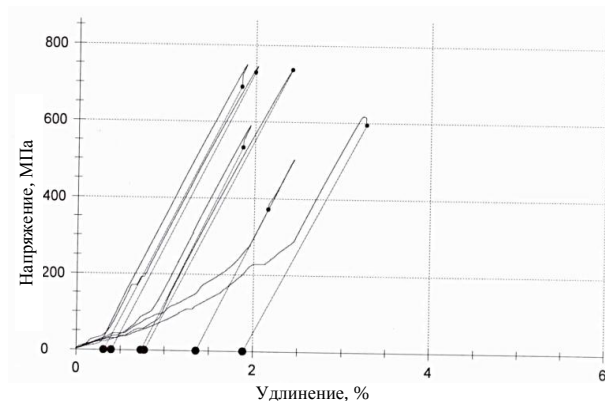


Рис.8. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении образцов базальтопластикового стержня нового типа – скрученно-винтовой формы

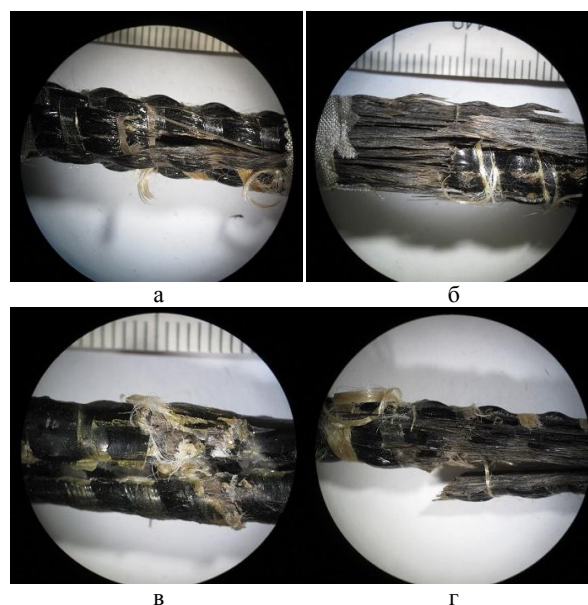


Рис.9. Виды разрушений опытных образцов базальтопластикового стержня: а – стержень с углеволокном; б – стержень с металлическим сердечником; в – стержень скрученно-винтовой формы; г – базальтопластиковый стержень

хрупкий характер. Оно наступает внезапно и характеризуется чередующимся разрывом волокон в разных, наиболее слабых сечениях и расслоением материала. Причиной расслоения являются касательные напряжения, возникающие в местах разрыва волокон.

Литература

1. Перкинс Ф. Железобетонные сооружения. Ремонт, гидроизоляция и защита» / Пер. с англ. А.В. Швецов; под ред. М.Ф. Цитрона, <http://www.bibliotekar.ru/>.
2. Wu Z., Wang X., Wu G. Basalt FRP composite as reinforcements in infrastructure // Ibaraki University, Hitachi, 316–8511, Japan.

Поступила в редакцию 01.10.2015

Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой

В.В. Лепов, В.С. Ачикасова, А.А. Иванова, К.Я. Лепова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Приведены основные положения и приложение структурного подхода к построению многоуровневых моделей накопления повреждений и разрушения материалов различной природы с иерархической структурой дефектности. Авторы, приняв в качестве основы подход микро- и макроскопического физического моделирования, расширяют его на сложные многоуровневые (многомасштабные) системы с внутренней микроструктурой, имеющей, как правило, иерархическую организацию и эволюционирующей под действием внешних факторов. Со временем это приводит к процессу накопления в материале повреждений и последующему разрушению. Дан анализ имеющихся многоуровневых подходов и показана возможность создания полномасштабных моделей на основе теоретического анализа и данных эксперимента. Авторы на основе работ отечественных и зарубежных авторов приходят к необходимости постановки эксперимента на субмикроскопическом уровне, позволяющего количественно оценить процесс накопления повреждений и выявить закономерности разрушения материалов. Новизной подхода является применение структурных моделей и логистической функции для оценки эволюции поврежденности на нескольких структурных уровнях, а также прямые экспериментальные наблюдения in situ процессов повреждения на наноуровне. В исследовании также даны перспективы применения немарковского подхода и байесовской интерпретации вероятности для оценки безопасности и прогнозирования ресурса техники, эксплуатируемой в условиях Севера.

Ключевые слова: многомасштабное моделирование, накопление повреждений, вязкохрупкий переход, ударная вязкость, локомотивное колесо, безопасность, прогноз ресурса.

A Structural Multiscale Approach to the Modeling of Evolutionary Processes in Materials with Internal Microstructure

V.V. Lepov, V.S. Achikasova, A.A. Ivanova, K.Ya. Lepova

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The article describes the main provisions and the application of a structured approach to building a multi-level model of damage accumulation and fracture of materials of different nature with the structure of defects at different scales. As the basis of the study an approach of micro-macroscopic physical modeling was adopted, which has been developed for complex multilevel (multiscale) systems with internal microstructure and evolving under the action of external factors. As a rule, this leads to the process of damage accumulation in the material, and subsequent fracture. The analysis of existing multi-level approaches has been done, and the possibility of creating full-scale models on the basis of theoretical analysis and experimental data has been discussed. The authors on the basis of works of domestic and foreign authors come to conclusion about the necessity of the experiment at submicroscopic level, allowing to quantify the process of damage accumulation and to identify the patterns of fracture. The novelty of the approach is the use of structural models and Verhulst logistic function to assess the evolution of damage at several structural levels, as well as direct experimental in situ observation of damage processes at the nanolevel. The study also describes the prospects of non-Markovian approach and Bayesian probability interpretation for safety evaluation and lifetime prediction of equipment operated in the North conditions.

Key words: multiscale modeling, damage accumulation, tough-brittle transition, impact toughness, locomotive tire, safety, lifetime prediction.

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. директора, leпов@iptpn.ysn.ru, wisecold@mail.ru; АЧИКАСОВА Валентина Семеновна – инженер, achikasova@iptpn.ysn.ru; ИВАНОВА Анастасия Анатольевна – м.н.с., anastiv@mail.ru; ЛЕПОВА Кюнна Яковлевна – н.с., lep_kya@mail.ru.

Введение

Важность учета внутренней неоднородности, структуры материала обусловила разработку и широкое применение так называемых структурных моделей накопления повреждений и разрушения. Основное преимущество использования структурного подхода, в том числе при оценке технического состояния и ресурса сложных технических систем – преодоление известных ограничений полумпирических моделей, не включающих в себя явного описания физических явлений, происходящих в материале [1].

Другим важным аспектом при моделировании процессов накопления повреждений и разрушения в реальных материалах является учет иерархичности структурных повреждений и неоднородности свойств материала на различных уровнях [2,3]. В большинстве случаев это позволяет учитывать статистические модели. При этом формулировка моделей на основе статистических гипотез, учитывающих вероятностный характер свойств материалов на микро- и макроскопических уровнях, является физически обоснованной и предоставляет больше возможностей для прогнозирования влияния неоднородности свойств на закономерности деформирования и разрушения реальных конструкций [4–6].

Статистические теории прочности являются практически единственной основой для расчетного определения предельного состояния реальных материалов и конструкций, расчетные характеристики которых должны задаваться средней величиной и дисперсией, или законом распределения, а не диапазоном. Это позволяет предсказывать механические свойства материала, уровень его поврежденности в неоднородном поле напряжений и определить критерии достижения макроскопического предельного состояния материалов в различных условиях на основе представлений о поврежденности структуры материала и статистической изменчивости его локальных свойств [4,7].

Еще одно важное преимущество объединенных структурных моделей – возможность переноса экспериментальных данных, полученных для одного из видов нагружения и поведения материала, на другие и объединения экспериментальных данных, относящихся к различным видам напряженного состояния и внешнего воздействия. С этой точки зрения модели и часть результатов, полученных для механических систем, может быть перенесена на другие, такие как энергетические комплексы, социальные, экономические и живые системы. В них, наряду с присутствием изменяющейся со временем внутренней структуры, существенными становятся процессы с памятью, или так называемые немарковские процессы [8].

Описание подхода

На рис. 1 показана схема комплексной оценки предельного состояния и прогнозирования ресурса сложных систем на основе подхода структурного моделирования [5]. Схема апробирована на технических системах и в настоящее время включает в себя элементы исследований энергетических комплексов и живых систем, подразумевая исследования накопления повреждений на различных масштабах, в том числе выявление механизмов и количественных закономерностей при воздействии экстремальных условий *in situ* и *in vitro* на нано- и микроуровне, а также дальнейшее стохастическое моделирование и прогноз ресурса (жизненного цикла).

При этом исходными данными для моделей являются полученные на основе зондовой и оптической микроскопии и фрактографии размеры и количественные параметры распределения дефектов на различных структурных уровнях, характеризующие соответствующими фрактальными размерностями и их изменениями в процессе накопления поврежденности. Под структурным уровнем в данном случае подразумевается область масштабов, в которой преобладающим является определенный дефект структуры (например, вакансия, дислокация, скопление дислокаций, микротрещина, микропора, полоса сдвига, неметаллическое включение).



Рис. 1. Схема оценки ресурса сложных систем на основе подхода многоуровневого структурного моделирования

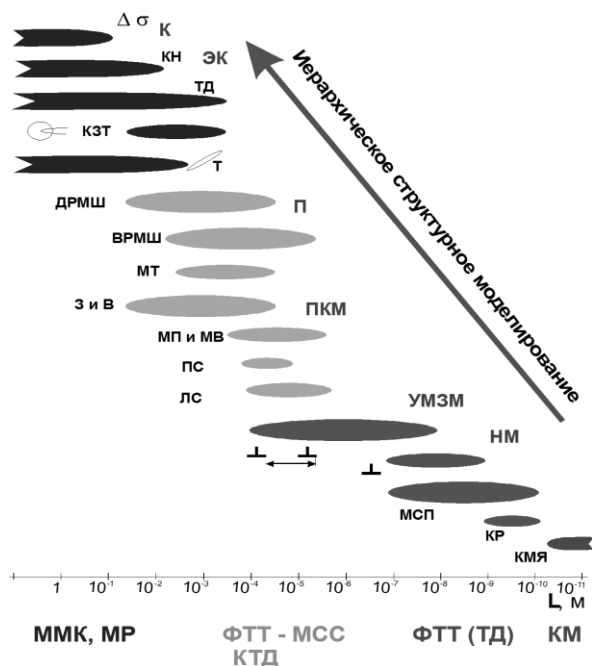


Рис. 2. Иерархия структурных элементов в конструкционных материалах, используемая для моделирования накопления повреждений и разрушения

На основе обобщения трудов ряда отечественных и зарубежных исследователей предложена схема иерархии структурных элементов в конструкционных материалах, которая может быть использована для структурного моделирования накопления повреждений и разрушения (рис.2).

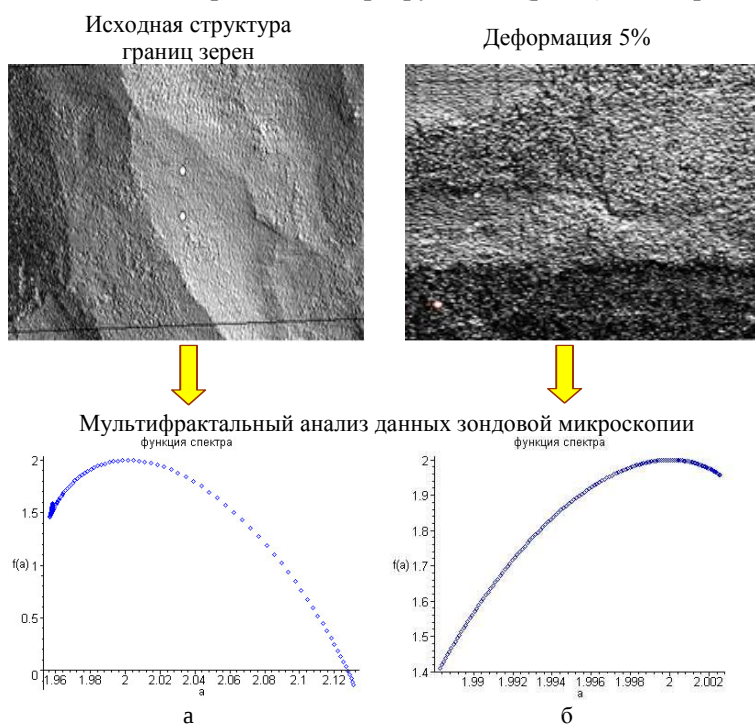


Рис. 3. Исследования эволюции параметров скейлинга и повреждения на наноструктурном уровне (увеличение $\times 64\,000$) хладостойкой стали: а – исходная структура; б – деформированная на 5%

Из ученых, внесших существенный вклад в понимание происходящих на различных структурных уровнях процессов и важность учета их взаимосвязанности для оценки прочности и ресурса материалов и конструкций, можно отметить В.Т. Троценко, С.Н. Журкова, Т. Yokobori, В.С. Иванову, В.В. Болотина, Л.Р. Ботвину, В.Е. Панина. Начиная от градиентов напряжений ($\Delta\sigma$) в конструкциях (К) и элементах конструкций (ЭК), вызываемых концентраторами напряжений (КН), технологическими дефектами (ТД), концевыми зонами (КЗТ) трещин (Т), воздействием различных внешних факторов, включая температурные, силовые, коррозионные и др. Также существенное влияние на прочность материала оказывает геометрия поверхности (П), выражаемая длиной и высотой рельефа микрошероховатости (ДРМШ и ВРМШ) и фрактальными размерностями. Внутреннее строение поликристаллических и композиционных материалов (ПКМ) представлено зернами и волокнами (З и В), молекулярной структурой полимеров (МСП), микропорами и микровключениями (МП и МВ), полосами и линиями скольжения (ПС и ЛС).

Отдельно можно выделить ультрамелкозернистые или субмикрокристаллические материалы (УМЗМ) и наноматериалы (НМ), в которых особую роль приобретает учет таких элементов структуры, как дислокации и средние расстояния между ними ($\perp - \perp$), дефекты кристаллической решетки (КР), квантовый масштаб ядра (КМЯ).

Из других обозначений на рис.2 можно отметить размер структурного элемента L и области науки, занимающиеся разработкой соответствующих моделей: ММК и МР – механика материалов и конструкций и механика разрушения, ФТТ – физика твердого тела, КТД – континуальная теория дислокаций, МСС – механика сплошных сред и КМ – квантовая механика.

Характеристики скейлинга (структурного подобия на различных уровнях дефектности) и повреждения поверхности, а также их эволюцию в ходе деформирования позволяет количественно оценить разработанная методика мультифрактального анализа изображений, полученных электронной атомно-силовой и туннельной микроскопией поверхности деформации и нагружаемых *in situ* образцов (рис.3) [9, 10].

Природа такого специфического явления, как вязкохрупкий переход, до конца еще не установлена, однако ряд проведенных исследований показал, что механизм его связан с затруднением дис-

локационного скольжения и ускоренным накоплением дефектности у границ зерен и вблизи структурных несовершенств [11]. Таким образом происходит охрупчивание материала и образование микротрещин, провоцирующих хрупкое разрушение при низких температурах. Совокупность факторов физико-химического состава, дислокационного скольжения, диффузионного переноса дефектов и отклика структурного строения материала при его деформировании и контролирует явление вязкохрупкого перехода. При этом особую важность приобретают исследования на наноструктурном уровне.

Данные и зависимости, полученные для эволюции дефектных структур на различных структурных уровнях, в дальнейшем используются для построения соответствующих моделей. К сожалению, в подавляющем большинстве современных моделей поведение систем определяется их текущим состоянием и никак не зависит от истории нагружения. Но если рассматривать жизненный цикл материала или конструкции, то разрушение представляет собой лишь конечную стадию последовательных процессов деформирования и деградации материала и определяется историей силовых, коррозионных, радиационных, температурных и других воздействий на него, а также изменениями структуры и физико-механических характеристик.

Немарковский подход и оценка риска

Стохастическая модель распространения трещины в многофазном, гетерогенном материале основана на механизме инициированного напряжения открытия микротрещин или микропор (в дальнейшем – микродефектов) на несплошностях или инородных включениях материала, их вязкопластическом росте и дальнейшей коалесценции с основной трещиной или близлежащими микродефектами [3,5,6].

Дальнейшая модификация модели производилась как в направлении – изменения вычислительных алгоритмов (в частности, применимых для динамического разрушения), так и в новых возможностях визуализации, представляемых развитием Web-ориентированного программирования, в частности, на языке Jade шаблонов нового поколения для Java script (рис.4). Модель представлена в виде Web-интерфейса по адресу <http://iptpn.ysn.ru/hdr/>. По просьбам иностранных коллег интерфейс переведен на английский язык.

Сложностью описания немарковских процессов является нелокальность их во времени, математически выражаемая в виде интегродифференциальных уравнений, которые и определяют эволюцию системы. Одним из следствий учета истории происходящих событий является изме-

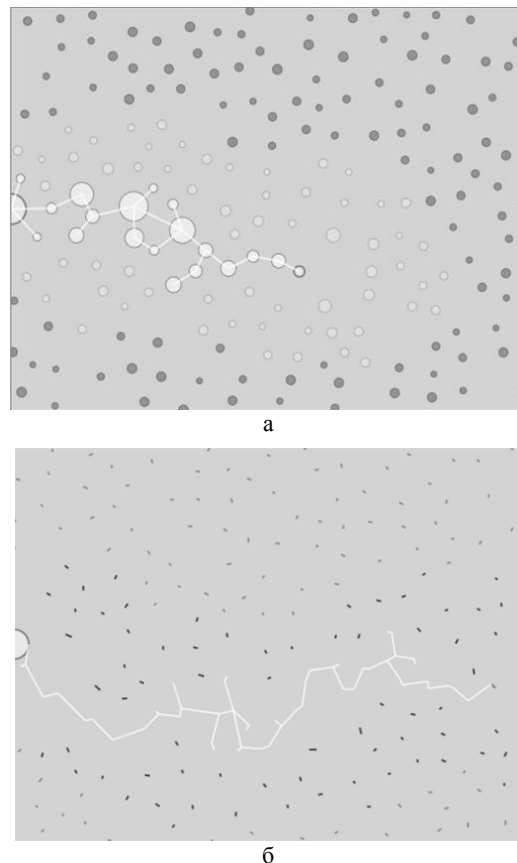


Рис. 4. Примеры визуализации роста трещин с различной конфигурацией начальных дефектов, реализованные на Java script: а – пластичный материал, вязкий рост пор; б – хрупкий материал, рост трещин

нение вероятностной картины. От классической частотной переходят к байесовской интерпретации вероятности, когда ее можно определить не как объективную случайность, а как меру незнания, которая уменьшается с получением дополнительных сведений о событии. С этой точки зрения байесовский подход является обобщением булевой логики, более обоснован и математически корректен.

Рассмотрен простейший случай немарковского процесса – накопление повреждений в ободе железнодорожного колеса. Интегральный эффект от множества различных дефектов, растущих и размножающихся на нескольких структурных уровнях (масштабах) в пределах локальной области, учтен зависимостью, выведенной ранее на основе логистического уравнения или уравнения Ферхюльста, для динамики дефектов дислокационного и недислокационного происхождения [12]:

$$\frac{d\psi}{dt} = f(T, \sigma) \cdot \psi \cdot (1 - \psi), \quad (1)$$

где ψ – поврежденность, T – температура, σ – напряжение.

С учетом приближенного решения этого уравнения и оценки вязкохрупкого перехода в стали испытаниями на ударную вязкость величина ударно-контактной поврежденности может быть записана в виде [13]:

$$\psi = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \int_{T_0}^{T_{ij}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m, \quad (2)$$

где KCV_0 и KCV_j – ударная вязкость стали при комнатной температуре, соответствующая моменту j -го повреждения, $m \sim 0,25-0,3$ – эмпирический коэффициент, зависящий от материала и вида НДС, K – общее число стыков рельс на эксплуатируемом участке железной дороги. Выражение (2) служит оценкой накопления поврежденности в материале бандажа локомотивных колес в условиях быстрого разрушения отколом при низких климатических температурах эксплуатации.

С учетом байесовского подхода к оценке вероятности и выражения для поврежденности (2) условие разрушения колеса при эксплуатации в зимнее время будет выглядеть следующим образом:

$$\psi = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[\left(1 - \frac{KCV_j}{KCV_0} \frac{p(T|\theta)p(\theta)}{\int_{\theta_0}^{\theta_j} p(T|\theta)p(\theta)d\theta} \right)^m \right] = 1, \quad (3)$$

где $p(\theta)$ – априорные знания о величине θ , а вероятность наблюдения выборки температуры колеса $T=(T_1, \dots, T_n)$ определяется значением $p(T|\theta)$. Априорные знания о температуре на участке эксплуатации колеса могут быть получены на основе метеорологических данных и в дальнейшем уточнены решением теплофизической задачи и результатами соответствующего эксперимента.

До сих пор в современных нормативных документах вероятность аварии или выхода техники из строя выражается как классическая вероятностная величина, оцениваемая приемлемым, или допустимым, статистическим риском. Расчет вероятности ведется без учета априорных знаний, уточнения значений в результате истории наблюдений и моделирования. С точки зрения безопасности задание величины приемлемого риска позволяет уйти от общей проблемы защиты от аварий и катастроф и свести ее к экономической задаче [14]. Ряд ключевых вероятностных факторов, влияющих на безопасность и их взаимодействие, не учитывается в должной мере, например, разброс свойств и накопление повреждений в материале, дефектность сварных швов, внешние воздействия, а также неквалифицированные действия персонала, что приводит к

неизбежности отказов и катастроф, а не к их предотвращению. Применение к оценке безопасности и ресурса техники подходов, основанных на немарковской парадигме, в частности, на байесовской интерпретации вероятности, позволит давать более четкие прогнозы и предотвращать жертвы, обусловленные техногенными факторами.

Заключение

Таким образом, в статье представлен структурный подход к многомасштабному моделированию накопления повреждений в гетерогенных материалах с микроструктурой по установленному механизму роста трещины в массиве взаимодействующих дефектов. Разработана расчетная модель накопления ударно-контактных повреждений в материале обода железнодорожного колеса при низких температурах, когда ударная вязкость конструкционной стали существенно падает в результате вязкохрупкого перехода. Предложено учитывать внутреннюю структуру материала и сложное напряженно-деформированное состояние в технических системах, эксплуатирующихся при низких климатических температурах, путём использования немарковского подхода в моделировании и байесовской интерпретации вероятности при оценке безопасности и риска.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №15-41-0501015) и в рамках научного проекта III.28.1.1 программы СО РАН.

Литература

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
3. Лепов В.В., Лепова К.Я., Алымов В.Т., Ларионов В.П. Стохастическое моделирование разрушения гетерогенной повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т.5, № 2. – С. 23–41.
4. Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2005. — 250 с.
5. Valeriy Lepov. Structural evolution model of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials // World Journal of Engineering. – 2013. – Vol. 10(3). – P. 205–212.
6. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 788–792.
7. Lepov V.V. et al. Modeling of the Damage Accumulation and Fracture: Structural-statistical Aspects // Key

Engineering Materials. – 2007. – Vol. 345–346. – P. 809–812.

8. Lepov V.V., Loginov A.B. Non-Markovian evolution approach to structural modeling of material fracture // World Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 9(3). – P. 207–212.

9. Лепов В.В., Ларионов В.П., Алымов В.Т. Новые подходы к оценке предельного состояния конструкций // Наука и образование. – 2001. – №3. – С. 36–42.

10. Лепов В.В., Иванова А.А., Ачикасова В.С., Лепова К.Я. Структурно-статистический подход к иерархическому моделированию эволюции поврежденности // Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»: тезисы докладов. – Павлодар, Казахстан, 20–22 сентября 2006 г. Электронный ресурс http://www.sbras.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+148+10056.

11. Ачикасова В.С., Лепов В.В. Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. – 2015. – № 1. – С. 75–77.

12. Григорьев А.В., Лепов В.В., Тагров В.Н. Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующейся в условиях низких климатических температур // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 35–39.

13. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 4. – С. 81–87.

14. Лепов В.В. Искусство принятия решений: краткая история и современное состояние // Наука и образование. – 1996. – № 2. – С. 93–97.

Поступила в редакцию 01.10.2015

УДК 620.172.224.2

Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали

А.М. Иванов, Н.Д. Петрова, В.В. Лепов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Представлен комбинированный метод интенсивной пластической деформации, сочетающий экструзию и винтовое прессование. Метод реализован в разработанном устройстве и позволяет получить металлический винтовой профиль из упрочненного ультрамелкозернистого материала. Описываются технологическая оснастка и параметры испытаний, приведены данные о структуре материала, механических свойствах низколегированной стали, подвергнутой комбинированному воздействию экструзией и винтовым прессованием. Измельчение структуры позволило повысить прочность стали в 1,4 раза со снижением пластичности на 38 %. Анализ структуры позволил предположить, что упрочнение материала произошло за счет дисперсионного упрочнения и повышения плотности дислокаций, в отличие от дробления и размытия зерен феррита в случае сильных степеней деформации, а также фрагментации субзернистых блоков при реализации схемы прессования с гидростатическим давлением.

Ключевые слова: экструзия, винтовое прессование, сталь, структура, механические свойства.

Influence of Extrusion and Helical Pressing on Structure and Mechanical Properties of Low-Alloy Steel

A.M. Ivanov, N.D. Petrova, V.V. Lepov

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

A combined method of intensive plastic deformation combining extrusion and screw pressing is presented. The method has been realized in the developed device and allows to produce a metal screw profile from a

ИВАНОВ Афанасий Михайлович – к.т.н., в.н.с., a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru; ПЕТРОВА Нюргуяна Дмитриевна – м.н.с., nakalykay@mail.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., проф., зам. директора, lepov@iptpn.ysn.ru.

Engineering Materials. – 2007. – Vol. 345–346. – P. 809–812.

8. Lepov V.V., Loginov A.B. Non-Markovian evolution approach to structural modeling of material fracture // World Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 9(3). – P. 207–212.

9. Лепов В.В., Ларионов В.П., Алымов В.Т. Новые подходы к оценке предельного состояния конструкций // Наука и образование. – 2001. – №3. – С. 36–42.

10. Лепов В.В., Иванова А.А., Ачикасова В.С., Лепова К.Я. Структурно-статистический подход к иерархическому моделированию эволюции поврежденности // Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»: тезисы докладов. – Павлодар, Казахстан, 20–22 сентября 2006 г. Электронный ресурс http://www.sbras.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+148+10056.

11. Ачикасова В.С., Лепов В.В. Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. – 2015. – № 1. – С. 75–77.

12. Григорьев А.В., Лепов В.В., Тагров В.Н. Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующейся в условиях низких климатических температур // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 35–39.

13. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 4. – С. 81–87.

14. Лепов В.В. Искусство принятия решений: краткая история и современное состояние // Наука и образование. – 1996. – № 2. – С. 93–97.

Поступила в редакцию 01.10.2015

УДК 620.172.224.2

Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали

А.М. Иванов, Н.Д. Петрова, В.В. Лепов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Представлен комбинированный метод интенсивной пластической деформации, сочетающий экструзию и винтовое прессование. Метод реализован в разработанном устройстве и позволяет получить металлический винтовой профиль из упрочненного ультрамелкозернистого материала. Описываются технологическая оснастка и параметры испытаний, приведены данные о структуре материала, механических свойствах низколегированной стали, подвергнутой комбинированному воздействию экструзией и винтовым прессованием. Измельчение структуры позволило повысить прочность стали в 1,4 раза со снижением пластичности на 38 %. Анализ структуры позволил предположить, что упрочнение материала произошло за счет дисперсионного упрочнения и повышения плотности дислокаций, в отличие от дробления и размытия зерен феррита в случае сильных степеней деформации, а также фрагментации субзернистых блоков при реализации схемы прессования с гидростатическим давлением.

Ключевые слова: экструзия, винтовое прессование, сталь, структура, механические свойства.

Influence of Extrusion and Helical Pressing on Structure and Mechanical Properties of Low-Alloy Steel

A.M. Ivanov, N.D. Petrova, V.V. Lepov

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

A combined method of intensive plastic deformation combining extrusion and screw pressing is presented. The method has been realized in the developed device and allows to produce a metal screw profile from a

ИВАНОВ Афанасий Михайлович – к.т.н., в.н.с., a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru; ПЕТРОВА Нюргуяна Дмитриевна – м.н.с., nakalykay@mail.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., проф., зам. директора, lepov@iptpn.ysn.ru.

strengthened ultrafine-grained material. The technological tooling and test parameters are described. The data about obtained ultrafine grain structure, mechanical properties of the low-alloyed steel subjected to the combined influence by extrusion and screw pressing are provided. After crushing of structure with grain refinement the steel durability increased by 1.4 times and its plasticity decreased by 38%. The analysis of the structure let us to assume that the material strengthening is caused by dispersive strengthening and increase of closeness of dislocations, unlike crushing and degradation of ferrite grains in case of strong extents of deformation, and also fragmentation the subgrain blocks at implementation of the scheme of pressing with hydrostatic pressure.

Key words: extrusion, screw pressing, steel, structure, mechanical properties.

Введение

Повышение физико-механических характеристик материалов методом изменения их структуры требует разработки новых методов и технологий обработки материалов и изучения механизмов их деформирования и разрушения. К одной из важнейших технических и технологических задач современного материаловедения относится получение заготовок сложной формы из объемных ультрамелкозернистых или наноструктурированных материалов. Известно, что методами интенсивной пластической деформации (ИПД) из заготовки определенной формы возможно получение изделия той же формы из упрочненного металлического материала [1,2]. Следующий этап – изготовление изделий нужной формы. Поэтому отдельный интерес представляет получение заготовок сложной формы, в частности, максимально приближенной к будущему изделию, непосредственно в процессе интенсивной пластической деформации. Решение такой задачи сократило бы число этапов обработки и продолжительность изготовления изделий.

Одним из перспективных методов ИПД является винтовая экструзия (ВЭ) [3]. В работе, посвященной экспериментальному исследованию этого метода [4], показано, что ИПД со сдвигом при винтовом прессовании без нагрева предварительно отожженной стали Ст3 приводит к значительному измельчению структуры зерен преимущественно с малоугловыми границами ($\approx 75\%$). В результате такого прессования со степенью деформации $\epsilon=4$ достигнуто значительное повышение прочности и снижение пластичности. Теплая винтовая экструзия низкоуглеродистой стали 20Г2С с накопленной деформацией $\epsilon=6$ приводит к измельчению структуры с сохранением значительной доли высокоугловых границ, размытию текстуры, однородному распределению зерен, а также к развитию динамической рекристаллизации [5]. Для этой же стали в [6] при тепловой ВЭ наблюдается неоднородность структуры: в продольном сечении преобладают вытянутые зерна (с фактором формы, равным 2), в поперечном – равноосные. Для управления процессом структурообразования в материале определен-

ные перспективы имеют комбинированные методы интенсивной пластической деформации со сдвигом, в которых реализуются различные схемы деформации.

Цель работы – изучить изменение структуры и механические свойства низколегированной конструкционной стали 09Г2С после комбинированного воздействия экструзией и винтовым прессованием.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – конструкционная низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки и после комбинированной обработки по схеме «экструзия + винтовое прессование». Химический состав стали 09Г2С: 0,1% С; 0,85% Si; 1,41% Mn; 0,17% Cr; 0,18% Ni; 0,35% Cu; остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)».

Нами предложен и реализован комбинированный метод, объединяющий две схемы – экструзию и винтовое прессование (ЭВП) с их реализацией в одном технологическом процессе и устройстве. В основу метода положен запатентованный способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок [7]. Данный комбинированный метод заключается в том, что объемная заготовка экструдировается, а затем продавливается через винтовой канал в одном устройстве. Комбинированная обработка заготовок $\varnothing 11,8 \times 60$ мм из стали 09Г2С выполнялась в разработанном устройстве (рис. 1). Продавливание заготовки (рис. 2,а) в $n=1$ проход осуществлялось с помощью технологического оборудования на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ усилием 1250 кН. При этом до обработки заготовка предварительно нагревалась и выдерживалась в муфельной печи до температуры 773 К, а затем помещалась в нагретую с помощью накидной печи до 773 К технологическую оснастку. Для уменьшения трения поверхности заготовки об стенки канала матрицы использовалась технологическая смазка «РО-СОЙЛ-АНГЕЛИНА» с добавками чешуйчатого графита. Усилие прессования не превысило 67 кН.

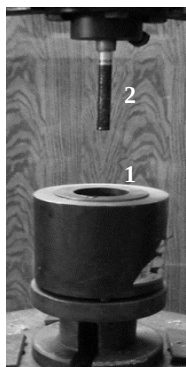


Рис. 1. Устройство для экструзии и винтового прессования: 1 – пуансон; 2 – оснастка (матрица с каналами)

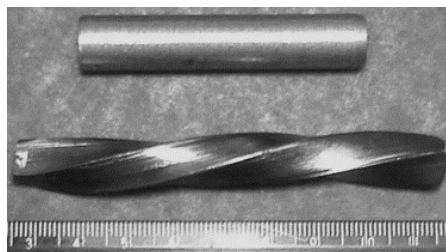


Рис. 2. Заготовки из стали 09Г2С до (а) и после (б) комбинированной обработки

Механические испытания на одноосное растяжение цилиндрических образцов из стали 09Г2С с рабочим размером $\varnothing 3 \times 15$ мм для определения механических свойств проводились на испытательной машине Инстрон-1195 при скорости нагружения $3,33 \cdot 10^{-5}$ м·с⁻¹. Структуру стали 09Г2С анализировали с помощью оптической микроскопии «Neophot-32». Средний размер зерна рассчитывали методом секущих усреднением результатов для более чем 20 зерен.

Результаты и обсуждение

В результате комбинированной обработки получили винтовой профиль из 09Г2С (рис. 2, б). Получение такого профиля объясняется тем, что длина калибрующего участка меньше диаметра окружности, описанной вокруг поперечного сечения канала.

При исследовании микроструктуры образцов ферритно-перлитной стали 09Г2С было выявлено, что средний размер зерна в исходном состоянии равен 11,97 мкм. В результате ЭВП формируется фрагментированная структура со средним размером зерна $\approx 7,8$ мкм, а также наблюдается вытянутость ферритных зерен вдоль оси прессования, что объясняется воздействием экструзии (рис. 3).

Анализ полученной микроструктуры позволяет предположить, что упрочнение материала произошло за счет дисперсионного упрочнения и повышения плотности дислокаций, т.к. существенно отличия в форме и размерах зерен не произошло. Как известно, при больших степенях деформации и многократных проходах равноканального углового прессования (РКУП) происходит сильное дробление и наблюдается размытие зерен феррита. При реализации схем кручения с гидростатическим давлением происходит также фрагментация субзеренных блоков, в результате чего наблюдается многократный рост физико-механических характеристик [3].

В данном же случае измельчение структуры позволило повысить прочность 09Г2С в 1,4 раза при снижении пластичности на 38 % (таблица).

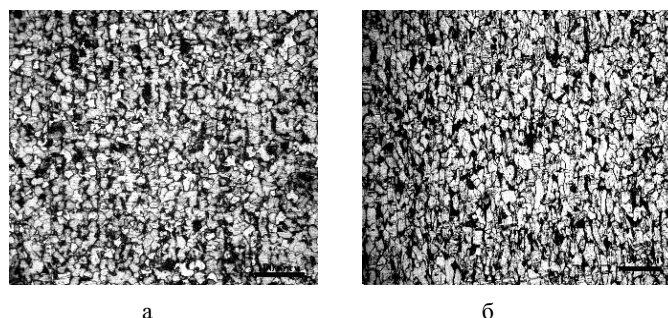


Рис. 3. Микроструктура стали 09Г2С: а – в состоянии поставки; б – после ЭВП в $n=1$ проход при 773 К

Механические характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

Состояние материала	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Исходное (состояние поставки)	361	521	36,65
Экструзия + винтовое прессование в $n=1$ проход при 773 К	645	725	22,65

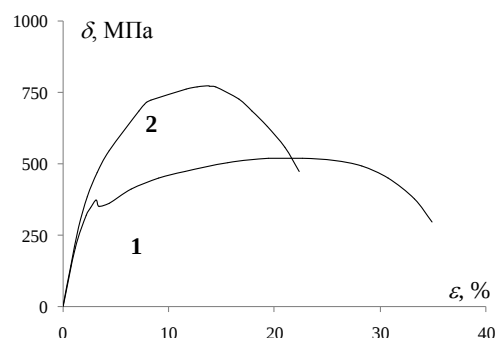


Рис. 4. Диаграммы растяжения стали 09Г2С в различных состояниях: 1 – состояние поставки; 2 – после обработки комбинированием экструзии и винтового прессования в $n=1$ проход при 773 К

Типичные кривые растяжения образцов стали 09Г2С в состоянии поставки и в упрочненном состоянии представлены на рис. 4. Вид кривой деформирования стали 09Г2С после комбинированной обработки качественно соответствует диаграмме деформирования упрочненного металла, например, равноканальным угловым

прессованием. Анализ кривой деформирования показывает, что область упругой деформации стали после упрочнения комбинированным методом увеличилась более чем в 3 раза. Тем самым повышается энергоёмкость разрушения материала на микроуровне, что ранее было показано на образцах, обработанных РКУП, в том числе при низкотемпературных испытаниях [8]. Поэтому следует ожидать повышения хладостойкости обработанных по данной технологии заготовок и изделий. Это должны показать испытания при низких климатических температурах.

Кроме прогнозирования свойств новых материалов, отдельный интерес представляет моделирование процессов интенсивной пластической деформации. В настоящее время моделирование таких процессов производится методами молекулярной динамики и конечно-элементного моделирования в гидродинамическом приближении. При этом модели первого вида ограничены объёмом рассматриваемого материала и идеализированными представлениями о структуре [9], а вторые применимы только в условиях ударно-динамического прессования [10]. Поэтому особый интерес представляют модели, основанные на описании эволюции повреждений в виде дефектов кристаллического строения, таких как дислокации и их скопления, а также роста и коалесценции микропор и микротрещин [11].

Заключение

Разработанный комбинированный метод экструзии и винтового прессования достаточно эффективен для упрочнения металлических материалов и получения профилей.

В результате экструзии и винтового прессования объёмной заготовки из 09Г2С достигнуто повышение предела текучести в 1,8 раз, предела прочности в 1,4 раза и снижение пластичности в 1,6 раз.

Повышение прочности стали 09Г2С связано с дисперсионным упрочнением и повышением плотности дислокаций в результате комбинированной обработки.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий упрочнения металлов и сплавов комбинированием экструзии и винтового прессования с получением винтовых профилей.

Исследование выполнено в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН.

Литература

1. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 231 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объёмные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. – Донецк: Фирма «ТЕАН», 2003. – 87 с.
4. Пашинская Е.Г., Мышляев М.М., Миронов С.Ю., Варюхин В.Н. Влияние деформации со сдвигом на микроструктуру и механические свойства стали Ст3 // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 105, № 1. – С. 86–94.
5. Пашинская Е.Г., Варюхин В.Н., Завдовеев А.В. и др. Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для исследования структуры деформированной стали // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 6. – С. 35–40.
6. Завдовеев А.В. Особенности формирования структуры и свойств малоуглеродистой стали при тепловой винтовой экструзии // Физика и техника высоких давлений. – 2013. – Т. 23, № 4. – С. 100–106.
7. Иванов А.М., Петрова Н.Д., Валиев Р.З. и др. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок // Патент 2341345 Рос. Федерация. № 2006111687/02; заявл. 10.04.06; опубл. 20.12.08. Бюл. №35. – 3 с.
8. Лепов В.В., Иванов А.М., Логинов Б.А. и др. Механизм разрушения наноструктурированной стали при низких температурах // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 11–12. – С. 149–157.
9. Скоробогатов М.С., Дудник Д.В., Дудник Е.А. Моделирование процесса интенсивной пластической деформации в модельном сплаве Ni₃Al (111) // Ползуновский альманах. – 2011. – № 2. – С. 96–98.
10. Шипачев А.Н., Зелепугин С.А. Моделирование процессов динамического канально-углового прессования // Забавихинские научные чтения: сб. материалов X Международной конференции. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. – С. 228.
11. Lepov V. Structural evolution model of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials // World Journal of Engineering. – 2012. – 10(3). – P. 205–212.

Поступила в редакцию 14.09.2015

Влияние равноканального углового прессования и закалки на ударную вязкость и характер разрушения образцов стали 09Г2С

М.З. Борисова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Рассмотрены особенности разрушения образцов конструкционной стали 09Г2С, полученных путем равноканального углового прессования (РКУП) с последующей закалкой, при разных температурах ударных испытаний. Проведенная термомеханическая обработка привела к значительному росту прочности в сочетании с высоким сопротивлением ударному разрушению, в том числе и при низких температурах испытаний. Установлено, что резкое снижение ударной вязкости сразу после РКУП обусловлено сменой основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в ультрамелкозернистом состоянии. Последующая термообработка материала оказала заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, что позволило сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск после РКУП повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C .

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, низколегированная сталь, ударная вязкость, механизм разрушения.

Influence of Equal Channel Angular Pressing and Quenching on Impact Strength and Fractures of Steel 09G2S

M.Z. Borisova

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

We have considered the fracture features of steel 09G2S obtained by equal channel angular pressing (ECAP) with subsequent tempering and tested at different temperatures of impact test. It is shown that the thermomechanical treatment led to a significant increase in strength coupled with high resistance to impact fracture, including low temperature tests. Found that immediately after ECAP there is a sharp decrease in toughness, which is due to a change of the main destruction mechanism from viscous patching in a coarse-grained condition to brittle fracture by quasi-spalling in ultrafine-grained state. Subsequent thermal treatment of the material had an obvious relaxing effect on the structure of the steel subjected to severe plastic deformation by the ECAP method, allowing it to maintain high strength of the material with simultaneous increase of impact values. It is established that quenching and subsequent short time heating after ECAP increased the energy of destruction more than 12 times at room temperature and almost 20 times at -60°C .

Key words: severe plastic deformation, equal channel angular pressing, low-alloy steel, impact strength, fracture mechanism.

Введение

Металлы и сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой обладают высоким комплексом физико-механических свойств, например, могут сочетать высокую прочность с достаточной пластичностью, кроме того, возможно и одновременное улучшение эксплуатационных свойств, т.е. целена-

правленно управляя структурными и фазовыми превращениями, можно добиться оптимального сочетания механических и служебных свойств данного материала. Эффективным путем получения УМЗ материалов является использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД), в основе

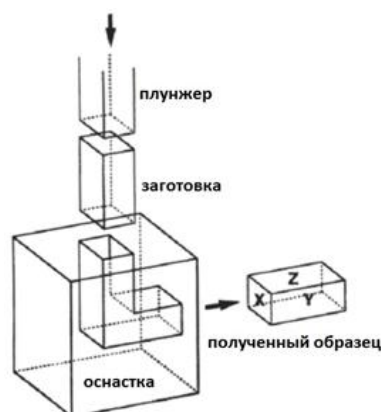


Рис. 1. Схема процесса РКУП: X – поперечная, Z и Y – продольные плоскости образца [2]

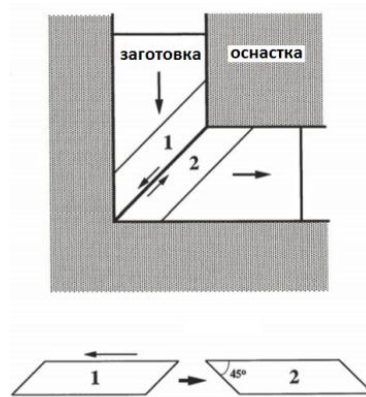


Рис. 2. Принцип процесса РКУП: 1–2 – плоскость сдвига, где элемент 1 транспонируется в элемент 2 [2]

которых лежит сочетание больших степеней деформации сдвига при температурах ниже температурного порога рекристаллизации материала и высоких давлений. Одним из наиболее распространенных методов ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП) [1–3]. В методе РКУП для получения УМЗ структуры в материале применяются металлические прутки диаметром от 10 до 60 мм [1]. Обрабатываемый материал продавливается через специальную оснастку с двумя пересекающимися каналами (рис. 1), в месте пересечения которых материал подвергается воздействию значительного квазигидростатического давления, которое обеспечивает однородную деформацию простого сдвига (рис. 2).

Высокие степени деформации, привнесенные в материал в ходе РКУП, ведут к формированию сильно фрагментированной и кристаллически разориентированной микроструктуры. Таким образом, происходит значительное измельчение структуры, вплоть до наноразмерного уровня. Изменяя уровень деформации, варьируя число циклов прохода заготовки через каналы, скорость и температуру деформации, можно управлять зёрненной и дислокационной структурой материала. Различают следующие маршруты РКУП (рис. 3):

маршрут А – ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе;

маршрут В – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 90° (B_A – со знакопеременным вращением образца и B_C – без изменения направления вращения);

маршрут С – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 180° .

Большинство работ по исследованию методов

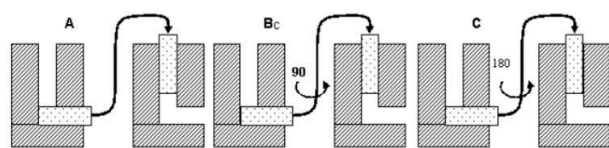


Рис. 3. Схема маршрутов РКУП [4]

ИПД сфокусировано на чистых металлах, что позволяет проследить изменения структурного состояния материала в отсутствии других фаз. Сталям же уделяется гораздо меньше внимания, несмотря на то, что это один из важнейших и наиболее распространенных в мире конструкционных материалов. Например, низколегированные стали могут обеспечить широкий диапазон механических и физических свойств и привлекают интерес исследователей к изучению физической природы повышения прочности, а также и механизмов их разрушения на различных масштабных уровнях [5–9].

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены на образцах стали 09Г2С со следующим химическим составом: С – 0,09; Si – 0,64; Mn – 1,26; P – 0,007; S < 0,003; Cr – 0,08; Ni – 0,1; Al – 0,02; Cu – 0,14; V < 0,002; Nb – 0,01; Ti – 0,013 %. РКУП проводили при температуре прессования 500°C , число циклов 4. Заготовки стали 09Г2С диаметром 20 мм и длиной 120 мм подвергали РКУП с углом пересечения каналов $\Phi=90^\circ$ по маршруту А. После РКУП была проведена закалка (8 мин при 910°C с охлаждением в масло) с последующим кратковременным отпуском (в течение 15 мин при 680°C).

Прочностные характеристики измерялись с помощью универсальной испытательной машины «ZWICK Z600» при комнатной температуре при скорости деформирования 2 мм/мин и величине предельной нагрузки 2 т. Ударная вязкость измерялась на образцах Шарпи при температурах испытания 20, -20 и -60°C на маятниковом копре «Roell Amsler RKP-450» с энергией удара 300 Дж. Исследования микрорельефа поверхностей излома были проведены с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F с интегрированным энергодисперсионным элементным анализатором EDX Oxford Instruments.

Результаты и обсуждение

Испытания на растяжение образцов стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C показали рост предела прочности с 690 МПа в исходном

крупнозернистом состоянии до 1150 МПа в УМЗ состоянии, таким образом прочность возросла в 1,7 раз. Но также при этом наблюдается значительное снижение пластичности, что может негативно отразиться на способности материала сопротивляться разрушению под действием ударной нагрузки.

Измерения величины ударной вязкости образцов Шарпи с применением метода испытания на ударный изгиб при разных температурах испытания показали, что равноканальное угловое прессование привело к резкому снижению значений ударной вязкости УМЗ материала по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием, почти в 10 раз при комнатной температуре и более чем в 12 раз при -60°C (рис. 4). При последующей после РКУП термообработки произошел значительный рост способности материала сопротивляться разрушению во всем диапазоне температур испытаний. Закалка и кратковременный отпуск привели к релаксации внутренних напряжений и к формированию структуры с более высокой энергией разрушения, чем сразу после РКУП, более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C (рис. 4).

Для выявления механизмов разрушения материала при испытаниях на ударный изгиб был проведен фрактографический анализ изломов образцов. Исследования микрорельефа поверхностей излома показали, что в исходном крупнозернистом состоянии для поверхности излома после ударных испытаний при комнатной температуре характерен вязкий ямочный рельеф, который сохраняется и при -20°C (рис. 5, а–б). На поверхности образца, разрушенного при комнатной температуре, в центральной части излома видны вязкие гребни, на вершинах которых имеются множественные неглубокие ямки, во впадинах – ямки глубокие равноосные (рис. 5, а). При снижении температуры испытаний до -60°C доминирующим микромеханизмом ударного разрушения становится микроскол (рис. 5, в).

Резкое снижение ударной вязкости материала после РКУП обусловлено появлением деформационной текстуры, образовавшейся в ходе интенсивной пластической деформации, и сменой основного механизма разрушения. Разрушение низколегированной стали 09Г2С после 4 циклов РКУП происходит по механизму квазискола с образованием гребней и ступенек (рис. 6).

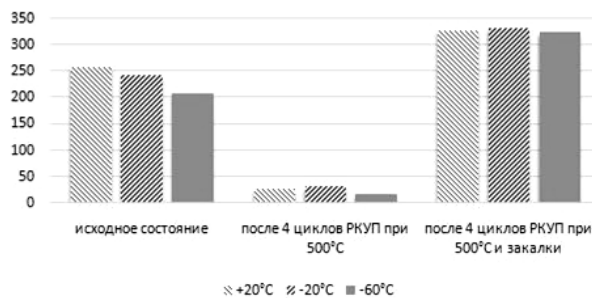


Рис. 4. Значения ударной вязкости стали 09Г2С в исходном состоянии, после РКУП и РКУП+закалка при различных температурах ударных испытаний (Дж/см²)

Такой микрорельеф характерен для разрушения полосчатой структуры. Закалка и последующий кратковременный отпуск привели к формированию практически свободных от дислокаций ячеистых структур и смене основного механизма ударного разрушения: с квазискола на вязкий ямочный во всем диапазоне температур испытаний (рис. 7). При испытаниях при комнатной температуре в очаге разрушения наблюдается вязкая зона сдвига с сильно вытянутыми ямками (рис. 7, а). При отрицательных температурах ударных испытаний излом состоит из глубоких равноосных различного размера ямок, чередующихся с порами, в центре

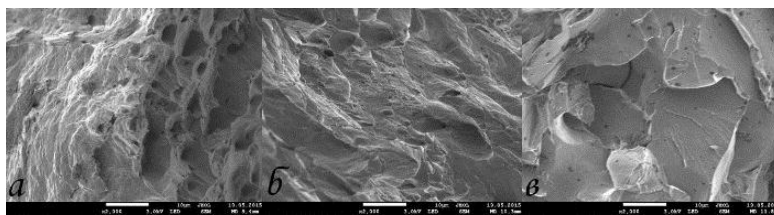


Рис. 5. Поверхности разрушения стали 09Г2С в исходном состоянии, при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

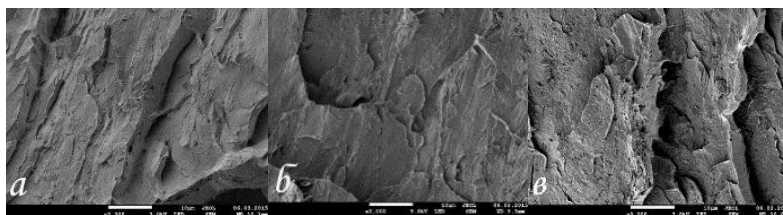


Рис. 6. Поверхности разрушения стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C , при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

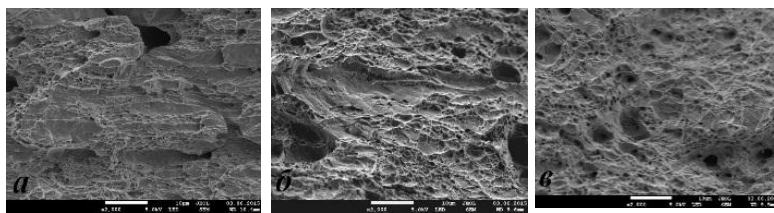


Рис. 7. Поверхности разрушения стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C и закалки, при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

некоторых из них видны круглые включения, являющиеся центрами зарождения пор (рис. 7,б–в). Путем энергодисперсионного элементного анализа выявлено, что сферические включения являются избыточной карбидной фазой Fe_3C .

Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают возможность улучшения конструктивных свойств низколегированной стали путем комбинирования равноканального углового прессования и закалки. Показано, что РКУП, формируя УМЗ структуру, повышает прочность стали 09Г2С в 1,7 раз по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства и ударную вязкость. Установлено, что РКУП привело к смене основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в УМЗ состоянии, а значит, несмотря на высокие прочностные характеристики материала после РКУП необходима последующая термообработка, позволяющая сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск оказали заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, и повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C . Результаты проведенной работы могут быть использованы при разработке технологий упрочнения и повышения хладостойкости конструкционных сталей.

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Valiev R.Z., Langdon T.G. Developments in the use of ECAP processing for grain refinement // Reviews on Advanced Materials Science. – 2013. – № 1. – P. 15–26.
3. Cojocaru V. D., Răducanu D., Șerban N. et al. Microstructural observations of fracture surfaces for a 6063-t1 ECAP processed aluminum alloy // Sci. Bull. – 2010. – Series B. – Vol. 72, Iss. 3. – P. 163–172.
4. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–120.
5. Borisova M., Yakovleva S., Makharova S. Investigation of steel 09G2S processed by equal channel angular pressing // Adv. Mat. Research. – 2015. – Vol. 1127. – P. 61–65.
6. Захарова Г.Г., Астафурова Е.Г., Найденкин Е.В. и др. Механические свойства и характер разрушения феррито-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию и высокотемпературным отжигам // Материаловедение. – 2010. – № 11. – С. 57–64.
7. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.А. Прочность и механизмы ударного разрушения наноструктурированных материалов // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 11. – С. 345–350.
8. Greger M., Vodarek V., Dobrzanski L.A. et al. The structure of austenitic steel AISI 316 after ECAP and low-cycle fatigue // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 151–158.
9. Lehrbacher C., Zinner S., Leitner H. Atome probe study of the carbon distribution in a hardened martensitic hot-work tool steel X38CrMoV5-1 // Micron. – 2012. – 43. – P. 818–826.

Поступила в редакцию 10.09.2015

УДК 622.691.4.004.14 (211), 620.171.2:620.186.4

Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики

А.М. Большаков, А.С. Сыромятникова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Приведены результаты исследования влияния длительной эксплуатации на структуру и механические свойств малоуглеродистой низколегированной стали трубы магистрального газопровода Республики Саха (Якутия). Показано, что протекающие на нанометровом масштабном уровне структурно-

БОЛЬШАКОВ Александр Михайлович – д.т.н., зав. отделом, a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru; СЫРОМЯТНИКОВА Айталипа Степановна – к.ф.-м.н., в.н.с., a.s.syromyatnikova@mail.ru.

некоторых из них видны круглые включения, являющиеся центрами зарождения пор (рис. 7,б–в). Путем энергодисперсионного элементного анализа выявлено, что сферические включения являются избыточной карбидной фазой Fe_3C .

Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают возможность улучшения конструктивных свойств низколегированной стали путем комбинирования равноканального углового прессования и закалки. Показано, что РКУП, формируя УМЗ структуру, повышает прочность стали 09Г2С в 1,7 раз по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства и ударную вязкость. Установлено, что РКУП привело к смене основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в УМЗ состоянии, а значит, несмотря на высокие прочностные характеристики материала после РКУП необходима последующая термообработка, позволяющая сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск оказали заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, и повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C . Результаты проведенной работы могут быть использованы при разработке технологий упрочнения и повышения хладостойкости конструкционных сталей.

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Valiev R.Z., Langdon T.G. Developments in the use of ECAP processing for grain refinement // Reviews on Advanced Materials Science. – 2013. – № 1. – P. 15–26.
3. Cojocaru V. D., Răducanu D., Șerban N. et al. Microstructural observations of fracture surfaces for a 6063-t1 ECAP processed aluminum alloy // Sci. Bull. – 2010. – Series B. – Vol. 72, Iss. 3. – P. 163–172.
4. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–120.
5. Borisova M., Yakovleva S., Makharova S. Investigation of steel 09G2S processed by equal channel angular pressing // Adv. Mat. Research. – 2015. – Vol. 1127. – P. 61–65.
6. Захарова Г.Г., Астафурова Е.Г., Найденкин Е.В. и др. Механические свойства и характер разрушения феррито-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию и высокотемпературным отжигам // Материаловедение. – 2010. – № 11. – С. 57–64.
7. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.А. Прочность и механизмы ударного разрушения наноструктурированных материалов // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 11. – С. 345–350.
8. Greger M., Vodarek V., Dobrzanski L.A. et al. The structure of austenitic steel AISI 316 after ECAP and low-cycle fatigue // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 151–158.
9. Lehrbacher C., Zinner S., Leitner H. Atome probe study of the carbon distribution in a hardened martensitic hot-work tool steel X38CrMoV5-1 // Micron. – 2012. – 43. – P. 818–826.

Поступила в редакцию 10.09.2015

УДК 622.691.4.004.14 (211), 620.171.2:620.186.4

Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики

А.М. Большаков, А.С. Сыромятникова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Приведены результаты исследования влияния длительной эксплуатации на структуру и механические свойств малоуглеродистой низколегированной стали трубы магистрального газопровода Республики Саха (Якутия). Показано, что протекающие на нанометровом масштабном уровне структурно-

БОЛЬШАКОВ Александр Михайлович – д.т.н., зав. отделом, a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru; СЫРОМЯТНИКОВА Айталипа Степановна – к.ф.-м.н., в.н.с., a.s.syromyatnikova@mail.ru.

деградационные процессы приводят к деградации структуры и свойств на микро- и макроуровнях. Рассмотрены разрушения и повреждения трубопроводов и оборудования газовой промышленности при их длительной эксплуатации в условиях Арктики и показана их взаимосвязь с деградацией физико-механического состояния металла конструкций. Анализ разрушений и повреждений объектов газовой промышленности при их длительной эксплуатации свидетельствует о необходимости принятия мер по развитию и внедрению новых методов неразрушающего контроля, учету изменения физико-механического состояния металла труб при длительной эксплуатации при разработке нормативных документов, регулирующих их строительство и эксплуатацию.

Ключевые слова: трубная сталь, магистральный газопровод, длительная эксплуатация, деградация свойств, разрушения и повреждения.

Destructions and Damages of Objects of the Main Gas Pipeline at Long Operation in Conditions of the Arctic

A.M. Bol'shakov, A.S. Syromyatnikova

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The results of a study of the influence of long operation on structure and mechanical properties of low-carbon and low-alloy steel of the pipe of the main gas pipeline in Republic of Sakha (Yakutia) are presented. It is shown that structurally degradation processes proceeding on nanometer scale level lead to degradation of structure and properties on micro- and macro-levels. Destructions and damages of pipelines and the equipment of the gas industry at their long operation in conditions of the Arctic are considered and their interrelation with degradation of a physical and mechanical condition of the constructions metal is shown. The analysis of destructions and damages of the objects testifies about the necessity of development and use of new methods of nondestructive control, and that it is necessary to take into account the change of a physical and mechanical condition of pipes metal at long operation when standard documents regulating their building and operation are worked out.

Key words: pipe steel, main gas pipeline, long operation, degradation of properties, destructions and damages.

Введение

Одной из важнейших научно-технических проблем современности становится проблема продления ресурса безопасной эксплуатации потенциально опасных высокорисковых объектов. К числу таких систем относятся магистральные газопроводы (МГ) из-за повышенного риска возникновения в них техногенных аварий, вызванных недостаточной эксплуатационной надежностью металла. Магистральные газопроводы Республики Саха (Якутия) являются уникальными металлоемкими конструкциями, которые проложены и эксплуатируются в зоне распространения вечномерзлых грунтов с 1970 г. Анализ возникновения аварийных ситуаций на магистральном газопроводе РС(Я) позволяет сделать вывод о том, что общее техническое состояние оборудования и газопроводов газопроводной системы ухудшается, их эксплуатационный ресурс практически исчерпан; при этом возрастает опасность отказов, обусловленных деградационными процессами в металле труб при их длительной эксплуатации [1–5].

В последнее десятилетие интенсивно проводятся экспериментальные работы, посвященные изучению механических свойств и структуры металла труб стареющих МГ [6–11]. Однако мнения исследователей относительно природы и роли процесса старения и его влияния на свойства трубных сталей не однозначны, а то и противоречивы.

Исследование характера изменений параметров сопротивления разрушению, а также структурного состояния и степени дефектности трубной стали 09Г2С после длительной (более 35 лет) эксплуатации в условиях Арктики показало следующее [11]. При длительной эксплуатации трубной стали протекают структурно-деградационные процессы: деформация и разрушение цементита в перлитных колониях, эволюция дислокационной субструктуры и образование карбидных выделений в объеме ферритных зерен. Эти процессы на микроуровне приводят к уменьшению содержания и изменению характера размерного и объемного распределения перлитных колоний, изменению микротвердости фазовых составляющих стали, на макроуровне – к дегра-

дации его механических свойств: снижению параметров сопротивления разрушению (ударной вязкости, работы зарождения трещины), к значительному понижению характеристик, отражающих сопротивление хрупкому разрушению – критической температуры хрупкости и отношения работы распространения трещины к работе ее зарождения в диапазоне климатических температур [11].

При этом стандартные механические свойства трубной стали: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение – остаются неизменными в рамках экспериментального разброса [11]. Это связано с протеканием при длительной эксплуатации структурно-деградационных процессов различной природы, конкурирующих во вкладе в прочностные свойства [11, 12].

Установление реального состояния металла труб магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях вечномерзлых грунтов, изучение закономерностей изменений их физического состояния в процессе длительной эксплуатации при различных условиях, а также определение причин, обуславливающих разрушение и повреждения на МГ, является актуальной задачей прогнозирования эксплуатационной надежности стареющих стальных конструкций. В работе приведен анализ причин и сценария развития аварий на МГ РС(Я) от развития усталостных повреждений при длительной эксплуатации.

Краткое описание аварий

В статье приведен анализ причин двух аварий на одном участке МГ Якутии (2003 г.) и разрушения коренной задвижки фонтанной арматуры (2008 г.).

Первая авария представляла собой раскрытие металла вдоль трубопровода по верхней части с многочисленными ветвлениями трещины на месте монтажного кольцевого шва (рис. 1).

Вторая авария представляла собой разрыв кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб от оси укладки с радиусом 30–50 м. Общая длина разрушения составила 22 м. Общий вид второго разрушения газопровода Берге-Якутск показан на рис. 2.

Разрушение задвижки фонтанной арматуры произошло в области перехода от корпуса задвижки к фланцевому соединению в месте стыковки внутренних стальных цилиндров, вид излома задвижки приведен на рис. 3.

Результаты и обсуждение

Разрушение трубы при первой аварии носило взрывной характер без возгорания, распространение трещин происходило механизмом отрыва, на местах остановки трещины переходящим на механизм сдвига с пластическими составляющими. Расчетное значение внутреннего давления

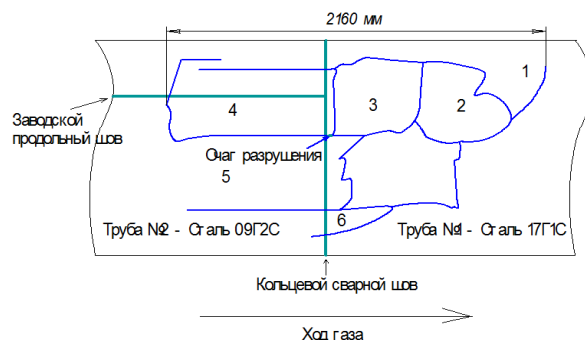


Рис. 1. Карта разрушения магистрального газопровода. Первая авария



Рис. 2. Общий вид разрушения магистрального газопровода. Вторая авария



Рис. 3. Строение излома задвижки фонтанной арматуры

в момент разрушения трубопровода составляло 4,54 МПа.

Материалы разрушившихся труб соответствовали маркам стали 17Г1С (труба №1) и 09Г2С (труба №2). Труба №2 эксплуатировалась с момента ввода газопровода (в течение 35 лет), а труба №1 была заменена и срок ее эксплуатации на момент аварии составлял 5 лет.

Исследование поверхности излома разрушения труб выявило, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны трубы перпендикулярно кольцевому шву в зоне термического влияния на месте

соединения основного металла и сварного шва и имеет достаточную протяженность и долговременность роста трещины. Окисление поверхности излома разрушения свидетельствует о длительном развитии трещины. Общая протяженность разрушения трубы составляет 2160 мм.

Трещина имела остановку при переходе к основному металлу, затем начала продвижение в глубь основного материала, где наблюдаются радиальные рубцы, исходящие от этой зоны, впоследствии перешедшие в магистральную трещину, образовавшую излом с шевронным узором. Трещина более длительно и равномерно развивалась по основному металлу в направлении, перпендикулярном максимальным растягивающим (окружным) напряжениям, которая характеризуется усталостными бороздками, и остановилась в сварном шве, что свидетельствует о достаточной сопротивляемости распространению трещины сварного шва по сравнению с основным металлом.

Схема излома с усталостной трещиной длиной 30 мм и глубиной 3,5 мм с тремя характерными основными зонами показана на рис. 4. Очаг усталостного разрушения покрыт толстым слоем коррозии и отложений органических продуктов, вследствие чего невозможно определить тонкую структуру очага разрушения. Зона усталостного излома имеет протяженность 30 мм и глубину 3,5 мм, просматривается бороздчатая структура, также присутствуют продукты коррозии. Зона ускоренного развития трещины содержит участки хрупкого разрушения с ручьистым узором, что свидетельствует о внутризеренном разрушении, наблюдаются питтинги (язвы) на участках скола, покрыта более тонким слоем продуктов коррозии.

Результаты механических испытаний показали повышение прочностных и снижение пластических характеристик материала труб на 7–8% от нормативных требований, понижение характеристик ударной вязкости в околосшовной зоне до 50% и более по сравнению с основным металлом трубопровода, что объясняется протеканием деграционных процессов в металле трубы при ее длительной эксплуатации.

Распространение трещины в трубах происходило по качественно различающимся траекториям: в трубе из более «старой» стали 17Г1С трещина распространялась с ветвлением, что привело к фрагментации трубы; в трубе из стали 09Г2С трещина распространялась прямолинейно без ветвления с дальнейшим отклонением от направления прямолинейного движения, начала двигаться по винтовой линии и закольцовалась.

При исследовании причин второй аварии было установлено, что значительных следов коррозии и

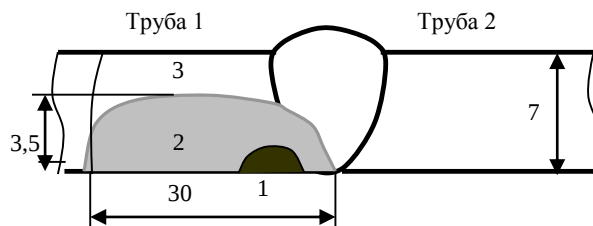


Рис. 4. Схема развития усталостной трещины: 1 – очаг возникновения трещины; 2 – зона усталостного распространения трещины; 3 – зона ускоренного развития трещины

утонения размеров стенки не наблюдается. Очагом разрушения послужила сквозная трещина – свищ, расположенная на нижней части трубопровода на месте соединения кольцевого сварного шва и заводского продольного шва. Свищ длиной 33 мм образовался от сварного дефекта – канальной поры размером 15х2 мм (рис. 5). Направление истечения газа было направлено в сторону грунта и в результате поднятия давления образовалась реактивная сила, послужившая началом разрыва кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб. Материал разрушившихся труб соответствовал марке стали 09Г2С. Расчетное значение внутреннего давления в момент разрушения трубопровода составляло 4,26 МПа.

Эти исследования впервые показали на наличие протяженных усталостных трещин в металле магистрального газопровода, сформировавшихся в результате длительной эксплуатации в условиях РС(Я), а также деформационное старение металла магистрального газопровода, построенного более 30 лет назад.

По сценарию образования усталостных микротрещин при эксплуатации в течение 25 лет, которое привело к формированию и распространению хрупкой макротрещины, произошло и разрушение коренной задвижки фонтанной арматуры. Разрушение произошло по зоне термического влияния сварного шва в области перехода от корпуса задвижки к фланцевому соединению в месте стыковки внутренних стальных цилиндров с технологическим изменением толщины, создающим концентрацию напряжений с внутренней стороны.

В момент разрушения давление на устье арматуры составляло 10,5 МПа, а температура окру-



Рис 5. Излом очага разрушения магистрального газопровода. Вторая авария



Рис. 6. Схема излома задвижки

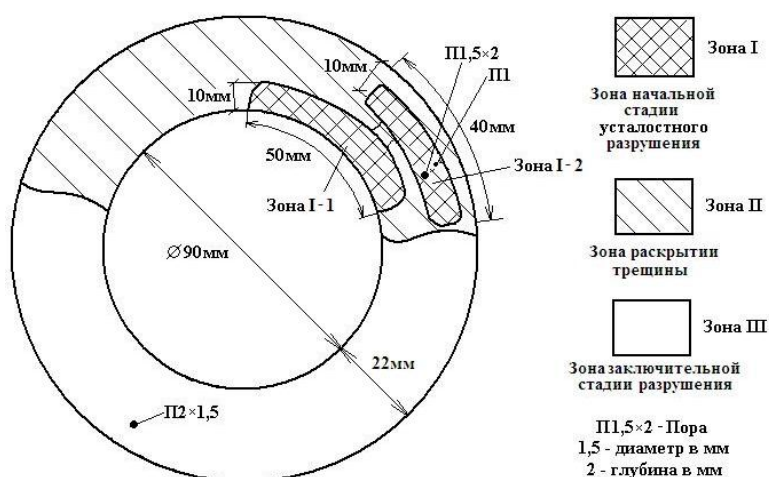


Рис. 7. Очаги усталостного разрушения на изломе задвижки

жающего воздуха равнялась -34°C . Схема излома приведена на рис. 6. Исследуемая поверхность излома полностью покрыта продуктами окисления, а часть поверхности – слоем нефтепродуктов, что свидетельствует о стадийности процесса разрушения детали. Корпус задвижки был изготовлен из стали 30ХГС и по механическим свойствам удовлетворял нормативным требованиям. Излом содержит два расположенных рядом очага разрушения, зону ускоренного развития трещины и зону долома.

Очаг разрушения, расположенный с внутренней стороны задвижки, состоит из слившихся многочисленных очагов усталостных микротрещин в виде характерных для малоциклового усталости «язычков» (указаны на рис. 7 стрелками). Усталостное разрушение развивалось под влиянием пульсирующего внутреннего давления. Раскрытие трещины и окончательное разрушение происходили по направлению от внутренней поверхности детали к внешней.

Анализ разрушения исследуемой детали показал следующее: под влиянием внутреннего давления в области стыковки внутренних цилиндров с технологическим изменением толщины, создающим концентрацию напряжений, зародились источники многоочагового малоциклового усталостного разрушения; распространение усталостных микротрещин вызвало объединение двух близко расположенных зон усталостного разрушения, что вызвало раскрытие трещины, затем произошло катастрофическое хрупкое разрушение детали по всему сечению.

Заключение

Анализ разрушений и повреждений объектов газовой промышленности РС(Я) при их длительной эксплуатации показывает на износ и образо-

вание сложно обнаруживаемых методами неразрушающего контроля дефектов в конструкциях после исчерпания нормативного срока эксплуатации и свидетельствует о необходимости принятия следующих мер: развитие и внедрение новых методов неразрушающего контроля оборудования и технических устройств, исчерпавших нормативный срок эксплуатации; ранжирование обнаруженных при диагностике дефектов в длительно эксплуатируемых конструкциях по степени риска возникновения катастрофического разрушения вследствие протекания деградиационных процессов в материале в процессе эксплуатации; разработка и принятие нормативных документов, регулирующих их строительство и эксплуатацию, с учетом изменения физико-механического состояния металла труб при длительной эксплуатации.

Литература

1. Большаков А.М., Голиков Н.И., Алексеев А.А. и др. Анализ аварий и отказов трубопроводов и оборудования нефтяной и газовой промышленности в условиях Севера. Часть 1. Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности // Газовая промышленность. – 2007. – №7. – С. 89–91.
2. Ермоленко Ю.Г., Большаков А.М., Черемкин М.К., Туги Р.Э. О техническом состоянии магистральных газопроводов Якутии // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – №10. – С. 5–7.
3. Слепцов О.И., Лыглаев А.В., Большаков А.М., Синцов С.А. Диагностика и безопасность стареющих больших механических систем, эксплуатирующихся в условиях Севера: Проблема и пути решения // Дефектоскопия. – 2008. – №6. – С. 31–41.
4. Большаков А.М., Татаринов Л.Н. Исследование динамики изменения надежности магистрального

газопровода после 30 лет эксплуатации в условиях Крайнего Севера // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 28–31.

5. Чухарева Н.В., Тихонова Т.В., Миронов С.А. Анализ причин аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера в период с 2000 по 2010 г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 231–243.

6. Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Дмитриев В.Ф. Дegradaция свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 84–87.

7. Лякишев Н.П., Кантор М.М., Воронин В.Н. и др. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации // Металлы. – 2005. – № 1. – С. 3–16.

8. Махутов Н. А., Пермяков В.Н., Кравцова Ю.А., Ботвина Л.Р. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т.73, № 2. – С. 35–43.

9. Багмутов В.П., Столярчук А.С., Трудов А.Ф. и др. Комплексная оценка деградации трубной стали на различных структурных уровнях после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – № 1. – С. 118–124.

10. Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов // Вестник Нижегородского университета. – 2010. – № 5. – С. 171–180.

11. Сыромятникова А.С. Дegradaция физико-механического состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях криолитозоны // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, вып. 2. – С. 85–91.

12. Сыромятникова А.С. Расчетно-экспериментальная оценка прочностных свойств металла длительно эксплуатируемого газопровода // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Т.2. 24–29 июня 2013 г. – Якутск: Ахсаан, 2013. – С. 49–53.

Поступила в редакцию 17.09.2015

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Физико-химическая биология

УДК 574.24:543.544.3:543.645.9

Динамика изменения жирно-кислотного состава щирицы запрокинутой, ярутки полевой и лофанта тибетского

И.В. Слепцов, Е.С. Хлебный, А.Н. Журавская

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Исследована динамика изменения жирно-кислотного состава щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus*), ярутки полевой (*Thlaspi arvense*) и лофанта тибетского (*Agastache rugosa*) при их выращивании в Центральной Якутии в процессе вегетации с июня по август. Выявлено количественное и качественное содержание насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в листьях исследуемых растений. Установлено, что максимальное количество жирных кислот содержалось в конце июня, минимальное – в начале августа. Основной ненасыщенной жирной кислотой является линоленовая кислота (C18:3Δ6,9,12), насыщенной – пальмитиновая кислота (C16:0) во всех исследуемых растениях. Выявлено, что с уменьшением температуры увеличивается процентное содержание ненасыщенных жирных кислот у всех трех видов исследуемых растений. Показано, что исследованные растения по-разному реагируют на изменение температурных условий произрастания, что проявляется в изменениях их жирно-кислотного состава. Это может свидетельствовать о различных механизмах адаптации к низкотемпературному стрессу.

Ключевые слова: *Amaranthus retroflexus*, *Thlaspi arvense*, *Agastache rugosa*, жирные кислоты, температурный стресс, коэффициент ненасыщенности.

Dynamics of Change of Fatty Acids Composition in the Leaves of *Amaranthus Retroflexus*, *Thlaspi Arvense* and *Agastache Rugose*

I.V. Sleptsov, E.S. Khlebnyy, A.N. Zhuravskaya

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

Dynamics of change of fatty acids composition in the leaves of *Amaranthus retroflexus*, *Thlaspi arvense* and *Agastache rugosa* is investigated at their cultivation in Central Yakutia in the course of vegetation from June to August. The quantitative and qualitative content of saturated and unsaturated fatty acids in the leaves of the studied plants is revealed. The maximum quantity of fatty acids was fixed at the end of June, the minimum - at the beginning of August. It is established that the main unsaturated fatty acid is the linolenic acid (C18:3Δ6,9,12), saturated - palmitic acid (C16:0) in all studied plants. It is revealed that with decrease of temperature the percentage of unsaturated fatty acids at all three species of the studied plants increases. It is shown that the studied plants differently react to change of temperature conditions of their growth that displays in changes of their fatty acid composition. This may testify to various mechanisms of adaptation to a low-temperature stress.

Key words: *Amaranthus retroflexus*, *Thlaspi arvense*, *Agastache rugosa*, fatty acids, temperature stress, saturated/unsaturated ratio.

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич – аспирант, peroxasg@mail.ru; ХЛЕБНЫЙ Ефим Сергеевич – к.б.н., с.н.с., chicloon@gmail.com; ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна – д.б.н., проф., г.н.с., jan43@mail.ru.

Введение

Изучение изменения состава жирных кислот (ЖК) липидов в растительных клетках в вегетационном и адаптационном процессах представляет большой интерес вследствие их значительной роли в функционировании клеточных мембран и в биоэнергетических реакциях [1]. Исследование жирно-кислотного состава перспективных с хозяйственной позиций растений поможет оценить их питательную ценность, сроки максимального содержания и количество незаменимых ЖК. Предполагается, что жирные кислоты способствуют адаптации растений к низкотемпературному стрессу [2]. Известно, что со снижением температуры уменьшается текучесть мембран. Это приводит к активации синтеза фермента десатуразы, который участвует в процессе получения полиненасыщенных ЖК [3,4]. В свою очередь, увеличение количества ненасыщенных ЖК приводит к восстановлению текучести мембран, т.е. устойчивость растений к низкотемпературному стрессу зависит и от активности десатураз [5]. Ранее было показано, что при осеннем закаливании растений, произрастающих в условиях криолитозоны, происходит увеличение содержания полиненасыщенных ЖК, что способствует увеличению их резистентности к низкотемпературному стрессу [6,7]. Увеличение содержания ненасыщенных и уменьшение насыщенных ЖК в процессе вегетации растений при снижении среднесуточных температур было отмечено и другими авторами на территории России [8]. Вместе с тем, остается не изученной динамика изменения жирно-кислотного состава исследуемых нами растений, произрастающих на территории Центральной Якутии, в процессе вегетации и изменений условий среды.

Целью исследования является изучение изменений жирно-кислотного состава щирницы запрокинутой, лофанта тибетского и ярутки полевой, произрастающих в условиях Центральной Якутии, в ходе их вегетации и адаптации к изменениям температуры среды.

Материалы и методы

В работе были использованы растения – щирница запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* (L.)), ярутка полевая (*Thlaspi arvense* (L.)) и лофант тибетский или многоколосник морщинистый (*Agastache rugosa* (Fisch. & C.A.Mey.)).

Amaranthus retroflexus и *Thlaspi arvense* являются однолетними, дикорастущими, травянистыми растениями, широко распространенными на территории Центральной Якутии. *Agastache rugosa* – многолетнее, дикорастущее, травянистое растение, произрастающее в Восточной Азии.

Семена растений высевали в открытый грунт в конце мая на территории Якутского ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Отбор листьев исследуемых растений проводили в 10 ч, с 30 июня по 4 августа с интервалом в одну неделю.

Для получения метиловых эфиров ЖК использовали метод кислотного гидролиза, описанный в ряде источников [8,9]. Сухую навеску листьев исследуемых растений, массой 50 мг, помещали в герметичные контейнеры, добавляли 1 мл 2,5% метанольного раствора H_2SO_4 и помещали на один час в термошейкер при 80°C и 1000 об./мин. После охлаждения до комнатной температуры (20°C) к полученному раствору добавляли 1 мл 0,9% раствора NaCl. Далее метиловые эфиры жирных кислот экстрагировали 0,5 мл гексана. Полученную смесь помещали в шейкер на 1 мин, затем центрифугировали 1 мин при 10 тыс. об./мин. Метиловые эфиры жирных кислот отбирали декантацией из супернатанта, для анализа брали 200 мкл.

Гексановый экстракт эфиров ЖК помещали в автосамплер хроматографа «МАЭСТРО» 7820/5975, построенного на базе газового хроматографа Agilent 7820 и масс-спектрометрического детектора 5975 того же производителя. Для разделения использовали капиллярную колонку HP-INNOWax (30 м, 0,25 мм, 0,25 мкм), скорость газа-носителя 2 мл/мин. Для ввода пробы объемом 10 мкл использовали лайнер без деления потока, температура инжектора 270°C. Температурная программа разделения: 40°C (5 мин); 250°C (4°C/мин, 5 мин). Температура линии, соединяющей хроматограф и масс-спектрометр, 270°C, температура источника ионов 230°C, температура детектора 150°C. Регистрацию осуществляли по полному ионному току (режим SCAN).

Для определения концентрации метиловых эфиров ЖК по разработанному методу провели калибровку с использованием набора стандартов метиловых эфиров ЖК фирмы «Supelco». 37-Component FAME Mix (кат. номер 18919-1MP). При построении калибровочной кривой среднеквадратичное отклонение составило менее 1% для всех использованных стандартов метиловых эфиров ЖК.

Коэффициент ненасыщенности ЖК рассчитывался по формуле (1) [10]:

$$K = \Sigma UFA / \Sigma SFA, \quad (1)$$

где K – коэффициент ненасыщенности, ΣUFA – сумма ненасыщенных жирных кислот, ΣSFA – сумма насыщенных жирных кислот.

Мониторинг температуры воздуха на поверхности почвы в месте отбора проб исследуемых рас-

Таблица 1

тений проводился с помощью автоматических регистраторов температуры ТР-2 ООО «Инженерные технологии» (Россия), позволяющих фиксировать температуру с интервалом 2 ч. Использовали среднюю температуру воздуха за 4 ч до отбора пробы вследствие динамического изменения ЖК состава растений от погодных условий [11].

Результаты и обсуждение

Концентрация (мкг/г.листьев) жирных кислот, сумма насыщенных и ненасыщенных, общая сумма жирных кислот и коэффициент ненасыщенности в листьях растений представлены в табл. 1–3. Анализ полученных результатов показывает, что основная насыщенная ЖК в листьях всех исследуемых растений – пальмитиновая кислота (C16:0). У *Amaranthus retroflexus* её содержание варьировало от 711,3 до 4837,9 мкг/г.листьев, у *Thlaspi arvense* – от 3643,9 до 5169,9 мкг/г.листьев, у *Agastache rugosa* – от 4051,1 до 4817,1 мкг/г.листьев. Основная ненасыщенная ЖК в листьях всех исследуемых растений – линоленовая кислота (C18:3Δ6,9,12) У *Amaranthus retroflexus* её содержание варьировало от 2042,8 до 10818,4 мкг/г.листьев, у *Thlaspi arvense* – от 9301,3 до 12922,9 мкг/г.листьев, у *Agastache rugosa* – от 9800,0 до 14253,4 мкг/г.листьев.

В листьях *Amaranthus retroflexus* в конце июня обнаружено 16 ЖК, из которых 4 моно- и 4 полиненасыщенные (табл. 1), к началу августа – 12 ЖК, из них 2 моно- и 5 полиненасыщенные. При этом концентрации полиненасыщенных ЖК значительно превышали концентрации мононенасыщенных в течение всего срока исследования. Концентрации ненасыщенных и насыщенных ЖК в листьях *Amaranthus retroflexus* с 30 июня по 4 августа уменьшались в 2,9 и 4,4 раза соответственно, а общее содержание ЖК – в 3,2 раза.

В листьях *Thlaspi arvense* обнаружено 16 ЖК, из которых 2 моно- и 4 полиненасыщенных (табл. 2). Концентрации ненасыщенных и насыщенных ЖК в листьях *Thlaspi arvense* с 30 июня по 4 августа немонокотонно уменьшались в 1,4 и 1,4 раза соответственно, а общее содержание ЖК – в 1,4 раза.

В листьях *Agastache rugosa* обнаружено 14 ЖК, из которых 2 моно- и 4 полиненасыщенных (табл. 3). Концентрации ненасыщенных и насыщенных ЖК в

Концентрация (мкг/г.листьев) жирных кислот, сумма насыщенных и ненасыщенных, общая сумма жирных кислот и коэффициент ненасыщенности в листьях *Amaranthus retroflexus*

Жирная кислота	Дата сбора					
	30.06. 2014	07.07. 2014	14.07. 2014	21.07. 2014	28.07. 2014	04.08. 2014
C6:0	28,3	10,9	2,1	4,1	tr	15,5
C14:0	16,5	tr	1,6	n/a	n/a	n/a
C14:1Δ9	2,3	n/a	tr	tr	n/a	n/a
C15:0	13,2	11,4	tr	4,3	n/a	n/a
C16:0	4837,9	4758,6	3070,0	3058	711,3	1320,4
C16:1Δ9	21,4	6,1	tr	0,3	tr	tr
C17:0	17,4	15,9	tr	4,9	tr	tr
C18:0	607,1	550,5	348,4	262,7	n/a	n/a
18:1Δ9	3,3	tr	tr	tr	tr	tr
C18:2Δ9,12	4572,1	4149,6	2241,3	2523,5	688,6	1261,9
C18:3Δ6,9,12	10818,4	12016,8	6684,9	6056,5	2042,8	4088,4
C20:0	44,5	29,5	5,8	tr	tr	tr
C20:1Δ11	45,5	54,7	14,1	11,4	tr	tr
C21:2Δ11,14	33,4	31,9	5,6	3,0	tr	tr
C21:3Δ11,14,17	27,1	35,4	10,4	7,0	tr	tr
C22:0	63,4	74,6	29,1	8,8	tr	tr
C23:0	43,8	46,7	22,4	15,6	tr	5,9
C24:0	275,2	343,3	90,5	60,4	tr	11,3
ΣUFA	15523,5	16294,5	8956,3	8601,7	2731,4	5350,3
ΣSFA	5947,3	5841,4	3569,9	3418,8	711,3	1353,1
ΣFA	21470,8	22135,9	12526,2	12020,5	3442,7	6703,4
K	2,6	2,8	2,5	2,5	3,8	4,0

Примечание. ΣUFA – сумма ненасыщенных ЖК, ΣSFA – сумма насыщенных ЖК, ΣFA – общая сумма ЖК, K – коэффициент ненасыщенности, tr – следовые количества, n/a – не обнаружено. Для всех полученных значений $p < 0,01$.

Таблица 2

Концентрация (мкг/г.листьев) жирных кислот, сумма насыщенных и ненасыщенных, общая сумма жирных кислот и коэффициент ненасыщенности в листьях *Thlaspi arvense*

Жирная кислота	Дата сбора					
	30.06. 2014	07.07. 2014	14.07. 2014	21.07. 2014	28.07. 2014	04.08. 2014
C6:0	12,2	12,6	13,4	6,4	4,3	tr
C14:0	55,6	93,7	119,1	120,3	117,8	170,9
C15:0	12,3	23,6	24,9	26,5	27,5	20,9
C16:0	5169,9	4682,3	4610,6	4952,9	4710,2	3643,9
C16:1Δ9	64,9	46,2	48,6	68,7	61,4	42,9
C17:0	35,0	34,2	43,9	67,9	66,0	61,4
C18:0	713,7	528,4	699,5	822,6	748,4	493,2
18:1Δ9	334,4	253,2	237,3	523,2	482,9	289,6
C18:2Δ9,12	3737,4	2840,0	2692,7	3410,1	3223,7	2206,2
C18:3Δ6,9,12	12763,9	12922,9	10651,2	12748,9	12097,0	9301,3
C20:0	64,1	22,6	48,6	49,2	21,6	15,5
C21:2Δ11,14	36,5	19,4	16,1	24,1	19,2	tr
C21:3Δ11,14,17	81,8	74,3	54,5	72,1	70,9	46,3
C22:0	42,4	18,2	35,9	12,1	tr	tr
C23:0	tr	5,8	7,9	16,4	10,6	4,8
C24:0	344,5	339,9	338,8	248,8	196,9	173,6
ΣUFA	17018,9	16156,0	13700,4	16847,1	15955,1	11886,3
ΣSFA	6449,7	5761,3	5942,6	6323,1	5903,3	4584,2
ΣFA	23468,6	21917,3	19643,0	23170,2	21858,4	16470,5
K	2,6	2,8	2,3	2,7	2,7	2,6

Примечание. То же, что к табл. 1.

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ЖИРНО-КИСЛОТНОГО СОСТАВА ЩИРИЦЫ ЗАПРОКИНУТОЙ

Т а б л и ц а 3

Концентрация (мкг/г.листьев) жирных кислот, сумма насыщенных и ненасыщенных, общая сумма жирных кислот и коэффициент ненасыщенности в листьях *Agastache rugosa*

Жирная кислота	Дата сбора					
	30.06. 2014	07.07. 2014	14.07. 2014	21.07. 2014	28.07. 2014	04.08. 2014
C6:0	tr	5,6	8,3	8,1	tr	4,3
C15:0	7,8	1,7	2,6	24,6	5,8	tr
C16:0	4817,1	4369,8	5213,5	4750,1	4317,6	4051,1
C16:1Δ9	41,1	42,6	82,1	49,4	44,5	44,7
C17:0	19,7	14,0	32,1	32,1	13,8	17,0
C18:0	650,4	590,0	806,0	544,0	456,5	387,7
C18:2Δ9,12	3473,1	2801,8	3408,6	2572,6	3379,9	2742,8
C18:3Δ6,9,12	14253,4	13051,5	12907,5	10763,9	11496,5	9800,0
C20:0	177,8	206,1	223,1	162,4	132,6	163,1
C20:1Δ11	25,4	17,7	13,9	8,07	13,1	1,9
C21:2Δ11,14	20,2	17,8	9,3	2,1	9,8	0,1
C21:3Δ11,14,17	72,9	61,5	48,9	37,4	48,2	27,8
C22:0	115,6	148,6	161,5	110,6	84,3	139
ΣUFA	17886,1	15992,9	16470,3	13433,5	14992,0	12617,3
ΣSFA	5788,4	5335,8	6448,8	5635	5010,6	4762,2
ΣFA	23674,5	21328,7	22919,1	19068,5	20002,6	17379,5
K	3,1	3,0	2,6	2,4	3,0	2,6

Примечание. То же, что к табл. 1.

листьях *Agastache rugosa* с 30 июня по 4 августа уменьшились в 1,4 и 1,2 раза соответственно, а общее содержание ЖК – в 1,4 раза.

Во всех исследуемых растениях с 30 июня по 4 августа уменьшалась концентрация ненасыщенных и насыщенных ЖК. Таким образом, для получения растительного материала с максимальным содержанием ЖК следует проводить сбор в конце июня.

Коэффициент ненасыщенности в листьях *Amaranthus retroflexus* снижался с повышением средней температуры воздуха за 4 ч до отбора пробы (рис.1). Исключение составляло 21 июля, где при снижении средней температуры на 6°C

коэффициент ненасыщенности не увеличивался. Это может обуславливаться тем, что температурный перепад на 6°C является не достаточным для активации ферментов десатураз в листовой ткани *Amaranthus retroflexus* и может обуславливаться его адаптационными механизмами к снижению температуры воздуха. Стоит отметить, что в дальнейшем в листьях *Amaranthus retroflexus* коэффициент ненасыщенности увеличивался на 52–60%, что может быть связано с ответной реакцией организма на снижение температуры. Следовательно, при длительном действии таких температур происходит активация ферментов десатураз и увеличивается процентное содержание ненасыщенных ЖК.

В листовой ткани растения *Thlaspi arvense* коэффициент ненасыщенности ЖК значительно уменьшался 14 июля, по-видимому, за счет высокой средней температуры воздуха за 4 ч до отбора пробы (рис. 2). При более низких температурах коэффициент ненасыщенности увеличивался. Таким образом, наблюдается обратная зависимость степени ненасыщенности ЖК листьев *Thlaspi arvense* от температуры окружающей среды. Это указывает на ведущую роль ненасыщенных ЖК в адаптации растений к снижению температуры.

В листовой ткани растения *Agastache rugosa* коэффициент ненасыщенности ЖК имел минимальные значения 14 и 21 июля (рис. 3). Следует отметить, что максимальная средняя температура воздуха за 4 ч до отбора пробы была только 14 июля. Из этого можно сделать вывод, что в листьях *Agastache rugosa* так же, как и у *Amaranthus retroflexus*, не происходит активации ферментов десатураз. Это может свидетельствовать о том,

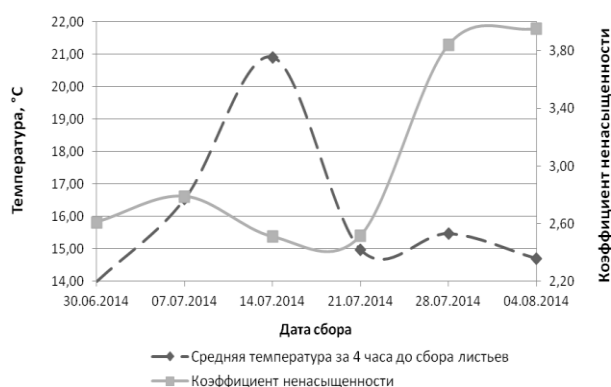


Рис. 1. Коэффициент ненасыщенности ЖК листьев *Amaranthus retroflexus* в зависимости от средней температуры воздуха за 4 ч до отбора пробы

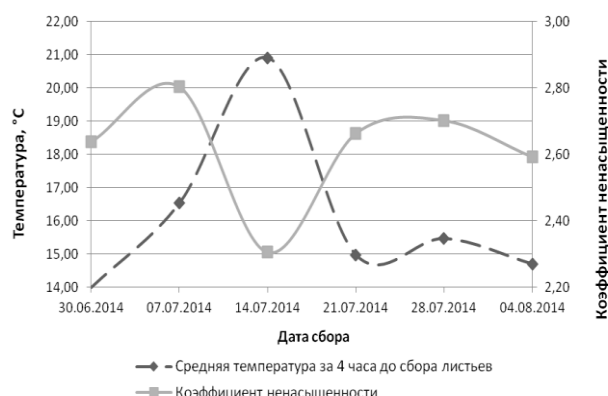


Рис. 2. Коэффициент ненасыщенности ЖК листьев *Thlaspi arvense* в зависимости от средней температуры воздуха за 4 ч до отбора пробы

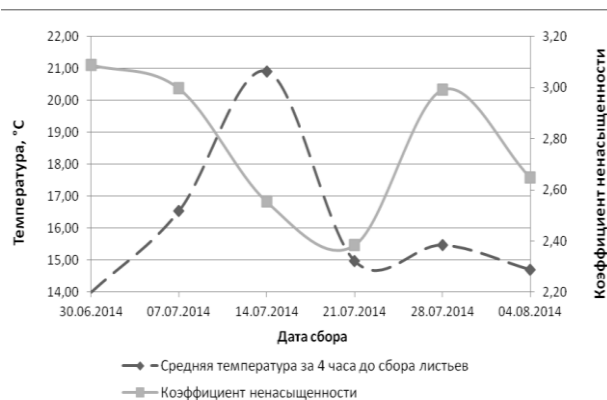


Рис. 3. Коэффициент ненасыщенности ЖК листьев *Agastache rugosa* в зависимости от средней температуры воздуха за 4 ч до отбора проб

что температурный перепад на 6 °C не является для него достаточным для активации ферментов десатураз в листовой ткани *Agastache rugosa* и может обуславливаться его адаптационными механизмами к снижению температуры воздуха. В дальнейшем в листьях *Agastache rugosa* так же увеличивается на 8–25% коэффициент ненасыщенности. Следовательно, на протяжении длительного периода действия таких температур происходит активация ферментов десатураз, это способствует повышению степени ненасыщенности ЖК в листовой ткани.

Таким образом, выявлена связь между температурой и коэффициентом ненасыщенности ЖК в листьях исследуемых растений. Установлено, что с уменьшением температуры в листьях *Amaranthus retroflexus*, *Thlaspi arvens* и *Agastache rugosa* увеличивается процентное содержание ненасыщенных ЖК, что подтверждают данные других авторов [2,6–8]. Также выявлены видовые различия изменений жирно-кислотного состава листьев исследуемых растений в зависимости от температурных условий их произрастания, связанные, по-видимому, с различиями механизмов адаптации растений к низкотемпературному стрессу.

Выводы

Установлено содержание в листьях *Amaranthus retroflexus* 16 жирных кислот, из которых 8 ненасыщенные, в листьях *Thlaspi arvense* 16 жирных кислот, из которых 6 ненасыщенные, в листьях *Agastache rugosa* 14 жирных кислот, из которых 6 ненасыщенные. Основная ненасыщенная ЖК во всех исследуемых растениях — линоленовая кислота (C18:3Δ6,9,12), а насыщенная — пальмитиновая кислота (C16:0).

Выявлено, что максимальное содержание ненасыщенных и насыщенных ЖК наблюдалось в конце июня, а минимальное — в начале августа.

Показано, что с уменьшением температуры увеличивается процентное содержание ненасыщенных ЖК в листьях всех исследуемых растений.

Отмечены видовые различия в изменениях жирно-кислотного спектра в зависимости от изменений температурных условий произрастания, связанные, по-видимому, с различиями в механизмах адаптации к низкотемпературному стрессу.

Работа выполнена в рамках НИР VI.56.1.5. «Физиолого-биохимические механизмы формирования адаптивного потенциала, устойчивости и продуктивности растительных компонентов экосистем Южной и Центральной Якутии» (№ госрегистрации 01201282194) и при финансовой поддержке гранта Главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов (№6 от 10 марта 2015г.).

Литература

1. Ударева Л.В., Коненкина Т.А., Шмаков В.Н., Макаренко С.П. Жирно-кислотный состав липидов каллусов двух видов лиственницы (*Larix gmelinii* и *Larix sibirica*) // Химия растительного сырья. – 2014. – № 2. – С. 121–127.
2. Новицкая Г.В., Суворова Т.А., Трунова Т.И. Липидный состав листьев в связи с холодостойкостью растений томатов // Физиология растений. – 2000. – Т. 47, № 6. – С. 829–835.
3. Los D.A., Murata N. Structure and expression of fatty acid desaturases // Biochem. et Biophys. Acta. – 1998. – Vol. 1394. – P. 3–15.
4. Ильинская Л.И., Озерецковская О.Л. Продукты липоксигеназного окисления жирных кислот как сигнальные молекулы в индуцировании устойчивости растений (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 467–479.
5. Лось Д.А. Структура, регуляция экспрессии и функционирование десатураз жирных кислот // Успехи биологической химии. – 2001. – Т. 41. – С. 163–198.
6. Нохсоров В.В., Дударева Л.В., Чепалов В.А. и др. Свободные жирные кислоты и адаптация организмов к холодному климату Якутии // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – Т. 38, № 1 – С. 127–134.
7. Петров К.А., Перк А.А., Чепалов В.А., Охлопова Ж.М. Особенности жирно-кислотного состава некоторых растений Якутии в период формирования криорезистентности // Вестник СВФУ. – 2011. – Т. 8, №2. – С. 26–29.
8. Граскова И.А., Дударева Л.В., Живетьев М.А. и др. Динамика сезонных изменений жирно-кислотного состава, степени ненасыщенности жирных кислот и активности ациллипидных десатураз в тканях некоторых лекарственных растений, произрастающих в условиях Предбайкалья // Химия растительного сырья. – 2011. – № 4. – С. 223–230.

9. S.M. Rahmat Ullah, Brett Murphy, Brian Dorich, Bruce Richter. Kannan Srinivasan Fat extraction from acid- and base-hydrolyzed food samples using accelerated solvent extraction // J. Agric. Food Chem. – 2011. – 59. – P. 2169–2174.

10. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород Центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* Lebeб., *Picea obovata* L.

и *Pinus sylvestris* // Химия растительного сырья. – 2009. – №. 2. – С. 71–76.

11. Розенцвейт О.Н., Нестеров В.Н., Богданова Е.С. и др. Влияние кратковременных и продолжительных колебаний факторов среды на состав липидов *Plantago media* в условиях Южного Тимана // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т.14, № 1(3). – С. 791–799.

Поступила в редакцию 25.08.2015

УДК 57.043:612.014.45

Влияние звуковых волн на параметры сердечно-сосудистой системы человека

О.Н. Колосова^{*,**}, Н.В. Мельгуй^{**}, С.Н. Скрыбина^{**}

^{*}Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

^{**}Медицинский институт Северо-Восточного федерального университета, г.Якутск

Проведено экспериментальное исследование изменений параметров сердечно-сосудистой системы (ССС) у человека при воздействии звуковых волн различных частот. В качестве звуковых волн были использованы классическая музыка (Моцарт), в которой представлены звуки в диапазоне частот (от 700 до 3 000 Гц), и «тяжелая» музыка (стиль дэт-металл, Cannibal Corpse) со сверхнизкими (15–30 Гц) и сверхвысокими (до 80 000 Гц) частотами. В эксперименте участвовали студенты-добровольцы (18–20 лет) коренной национальности. Классическая музыка у женщин (Ж) вызывает повышение артериального давления, особенно систолического в группе экстравертов и имеющих высокий уровень нейротизма (ВН, $p < 0,001$). У мужчин (М) с ВН, независимо от уровня экстраверсии, Соната ре мажор Моцарта определяет снижение ($p < 0,05$) величин показателей ССС. При различных уровнях нейротизма прослушивание «тяжелой» музыки оказывает противоположное воздействие на М и Ж ($p < 0,05$, $r = 0,784$). Показатели ССС у Ж повышаются, а у М, наоборот, снижаются. У экстравертов, независимо от половой принадлежности, снижаются параметры ССС, а у интровертов – повышаются ($p < 0,05$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер изменений параметров ССС при воздействии звуковых волн зависит от гендерных и индивидуально-типологических (экстраверсия-интраверсия, уровень нейротизма) особенностей человека.

Ключевые слова: звуковые волны, музыка, сердечно-сосудистая система, экстраверсия, эмоциональная устойчивость, гендерные различия, Север, экология.

The Influence of Sound Waves on Parameters of Cardiovascular System of Humans

O.N. Kolosova^{*,**}, N.V. Melgui^{**}, S.N. Skryabina^{**}

^{*}Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

^{**} Medical Institute of North-Eastern Federal University, Yakutsk

Changes of parameters of the human cardiovascular system (CVS) when a person is being exposed to sound waves of different frequencies are experimentally investigated. Classical music (Mozart) which presents the sounds in the frequency range (from 700 to 3000 Hz) and heavy music (style death metal, Cannibal Corpse)

^{*,**}КОЛОСОВА Ольга Николаевна – д.б.н., проф., в.н.с. ИБПК СО РАН, научн. рук. лаб. НПИ Клиники МИ СВФУ, kololgonik@gmail.com; ^{**}МЕЛЬГУЙ Наталья Владимировна – аспирантка, 8924-661-30-63@mail.ru; ^{**}СКРЯБИНА Светлана Николаевна – ст. преподаватель, skryabinasn@mail.ru.

9. S.M. Rahmat Ullah, Brett Murphy, Brian Dorich, Bruce Richter. Kannan Srinivasan Fat extraction from acid- and base-hydrolyzed food samples using accelerated solvent extraction // J. Agric. Food Chem. – 2011. – 59. – P. 2169–2174.

10. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород Центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* Lebeб., *Picea obovata* L.

и *Pinus sylvestris* // Химия растительного сырья. – 2009. – №. 2. – С. 71–76.

11. Розенцвейт О.Н., Нестеров В.Н., Богданова Е.С. и др. Влияние кратковременных и продолжительных колебаний факторов среды на состав липидов *Plantago media* в условиях Южного Тимана // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т.14, № 1(3). – С. 791–799.

Поступила в редакцию 25.08.2015

УДК 57.043:612.014.45

Влияние звуковых волн на параметры сердечно-сосудистой системы человека

О.Н. Колосова^{*,**}, Н.В. Мельгуй^{**}, С.Н. Скрыбина^{**}

^{*}Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

^{**}Медицинский институт Северо-Восточного федерального университета, г.Якутск

Проведено экспериментальное исследование изменений параметров сердечно-сосудистой системы (ССС) у человека при воздействии звуковых волн различных частот. В качестве звуковых волн были использованы классическая музыка (Моцарт), в которой представлены звуки в диапазоне частот (от 700 до 3 000 Гц), и «тяжелая» музыка (стиль дэт-металл, Cannibal Corpse) со сверхнизкими (15–30 Гц) и сверхвысокими (до 80 000 Гц) частотами. В эксперименте участвовали студенты-добровольцы (18–20 лет) коренной национальности. Классическая музыка у женщин (Ж) вызывает повышение артериального давления, особенно систолического в группе экстравертов и имеющих высокий уровень нейротизма (ВН, $p < 0,001$). У мужчин (М) с ВН, независимо от уровня экстраверсии, Соната ре мажор Моцарта определяет снижение ($p < 0,05$) величин показателей ССС. При различных уровнях нейротизма прослушивание «тяжелой» музыки оказывает противоположное воздействие на М и Ж ($p < 0,05$, $r = 0,784$). Показатели ССС у Ж повышаются, а у М, наоборот, снижаются. У экстравертов, независимо от половой принадлежности, снижаются параметры ССС, а у интровертов – повышаются ($p < 0,05$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер изменений параметров ССС при воздействии звуковых волн зависит от гендерных и индивидуально-типологических (экстраверсия-интраверсия, уровень нейротизма) особенностей человека.

Ключевые слова: звуковые волны, музыка, сердечно-сосудистая система, экстраверсия, эмоциональная устойчивость, гендерные различия, Север, экология.

The Influence of Sound Waves on Parameters of Cardiovascular System of Humans

O.N. Kolosova^{*,**}, N.V. Melgui^{**}, S.N. Skryabina^{**}

^{*}Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

^{**} Medical Institute of North-Eastern Federal University, Yakutsk

Changes of parameters of the human cardiovascular system (CVS) when a person is being exposed to sound waves of different frequencies are experimentally investigated. Classical music (Mozart) which presents the sounds in the frequency range (from 700 to 3000 Hz) and heavy music (style death metal, Cannibal Corpse)

^{*,**}КОЛОСОВА Ольга Николаевна – д.б.н., проф., в.н.с. ИБПК СО РАН, научн. рук. лаб. НПИ Клиники МИ СВФУ, kololgonik@gmail.com; ^{**}МЕЛЬГУЙ Наталья Владимировна – аспирантка, 8924-661-30-63@mail.ru; ^{**}СКРЯБИНА Светлана Николаевна – ст. преподаватель, skryabinasn@mail.ru.

with ultra-low (15–30 Hz) and ultra-high (up to 80 000 Hz) frequencies were used. Students-volunteers (18–20 years old) of the indigenous nationality (the Yakuts) took part in the experiment. It was established that the classical music causes an increase of blood pressure in women, especially of systolic (SBP) in the group of extroverts and having high levels of neuroticism ($p < 0,001$). Men with high levels of neuroticism, regardless of the level of extraversion, Mozart's Sonata in D major causes a decrease ($p < 0,05$) of the indices of the CVS. At different levels of neuroticism audition of heavy metal music has the opposite effect on men and women ($p < 0,05$, $r = 0,784$). CVS indicators are rising among women and are falling in men. CVS parameters of extroverts, regardless of gender, reduce, while CVS parameters of introverts increase ($p < 0,05$). The results suggest that changes in the parameters of the CVS under the influence of sound waves depend on gender and individual-typological (extraversion-introversion, neuroticism level) characteristics of a person.

Key words: sound waves, music, cardiovascular system, extroversion, emotional stability, gender differences, North, ecology.

В основе адаптации организма человека к условиям окружающей среды лежит синхронизация собственных эндогенных ритмов с внешними периодическими ритмами. Мир, окружающий человека, заполнен волнами различной физической природы: звуковыми, световыми, радиоволнами и т.д. Основным свойством всех волн, независимо от их природы, является осуществление переноса энергии без переноса вещества. Источники звука (голос, музыкальные инструменты, теле- и радиоприемники, транспорт, бытовые приборы и т.д.) создают в окружающей среде вокруг себя звуковые поля сложной структуры [10].

Звуковые волны, получаемые человеком из окружающей среды, распознаются с помощью слуховой сенсорной системы, передающей информацию в корково-подкорковые центры, отвечающие за возникновение соответствующего эмоционально окрашенного поведения. Звуковой сигнал может быть описан определенным набором физических характеристик: частота, интенсивность, длительность, временная структура, спектр и др. При восприятии звуков слуховой сенсорной системой этим характеристикам соответствуют определенные субъективные ощущения: громкость, высота, тембр, биения, консонансы-диссонансы, маскировка, локализация-стереоэффект и т.п. [11,16]. Слуховая сенсорная система человека способна воспринимать звуковые колебания с частотой от 16 до 20 000 Гц. Звук с частотой ниже 16 Гц (что соответствует ноте «ми» субконтроктавы) называется инфразвуком, а выше 20 000 Гц – ультразвуком.

В современном городе человек постоянно подвергается воздействию как техногенных шумов (транспорт, производственный и бытовой шум и т.д.), так и воздействию музыки, что связано с широким и вездесущим распространением «масс-медиа», переносных гаджетов и т.д. Если техногенные шумы, являясь стресс-факторами, оказывают десинхронизирующее действие на организм, то воздействие музыки на человека не столь однозначно. В музыке обычно используются звуки,

высота (основная частота) которых лежит от субконтроктавы до 5-й октавы. Известно, что благоприятное воздействие на организм оказывает классическая музыка (КМ), музыкальные произведения с использованием звуков природы [12,13]. В то же время современная «тяжелая» музыка («рок», «техно», «рейв» и т.п.) (ТМ) может оказывать негативное влияние, нарушая синхронизацию функций организма [3,15,16]. При воздействии внешних факторов любой природы, в том числе при воздействии звуковых волн, в организме происходят перестройки, обеспечивающиеся изменением активности одной из основных компенсаторно-приспособительных систем организма – сердечно-сосудистой системы (ССС). Кроме того, скорость и направленность перестройки зависят от состояния психоэмоционального напряжения организма [6,14,15]. Научные исследования свидетельствуют о возможности использования музыкальной терапии в обеспечении оптимизации регуляции сердечного ритма (СР), усилении координации деятельности двух приспособительных систем (ССС и дыхательной системы), улучшении эмоционального состояния и психофизиологических функций [4, 7–9, 12–15]. В настоящее время музыкотерапию определяют как систему психосоматической регуляции функций организма человека [11].

Цель настоящего исследования – изучение влияния звуковых волн на параметры сердечно-сосудистой системы человека в условиях высоких широт в зависимости от гендерных и индивидуально-типологических особенностей.

Для достижения данной цели была поставлена следующая задача: изучить влияние классической (Моцарт, Соната ре мажор) и «тяжелой» музыки (стиль дэт-металл, *Cannibal Corpse*) на параметры ССС мужчин и женщин в зависимости от уровня нейротизма и экстравертности.

Материал и методы исследования

Исследование выполнено на базе лаборатории нейропсихологических исследований Клиники Медицинского института СВФУ и Институ-

та биологических проблем криолитозоны СО РАН в период с 2011 по 2015 г. Объектом исследования являлись студенты (1-х и 2-х курсов СВФУ ($n = 356$)). Основными критериями отбора участников исследования были: пол (мужчины, женщины), национальность (якуты), возраст (половозрелый период с 18 до 22 лет), принцип добровольности. На момент проведения исследований все испытуемые не имели признаков заболеваний и были признаны практически здоровыми. Испытуемые, мужчины и женщины, достоверно не различались по индексу массы тела (ИМТ, индекс Кетле), найденному по формуле:

$$ИМТ = \frac{m}{h^2},$$

где m – масса тела, кг, h – рост, м².

В данных группах средние величины ИМТ не имели отклонений от нормальных значений – 19,5–22,9 для возраста 16–25 лет [5]. Исследования выполнены в стандартных условиях, в первой половине дня, при исключении внешних психогенных факторов. Исследование проводилось в полном соответствии с этическими рекомендациями Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации и «Основами законодательства РФ об охране здоровья граждан (1993 г.).

Показатель нейротизма диагностировался с помощью опросника Г. Айзенка (Eysenk Personality Inventory или EPI) форма А [1]. Опросник состоит из 57 вопросов, в том числе 48 тестов предназначены для диагностики экстра- и интроверсии и нейротизма, 9 – для определения «шкалы лжи», тенденции обследуемого представить себя в лучшем свете. Показатель экстраверсии характеризует индивидуально-психологическую ориентацию личности или преимущественно на мир внешних объектов, или на внутренний субъективный мир. Средний балл по этой шкале составляет 11–14. При баллах от 0 до 10 ориентация относится к полюсу интроверсии, от 15 до 24 – экстраверсии.

Показатели нейротизма (эмоциональной неустойчивости) могут принимать значения от 0 до 24 баллов. Оценка уровня нейротизма проводилась следующим образом: менее 11 баллов – высокая эмоциональная устойчивость (низкий уровень нейротизма, НН), 11–14 баллов – средняя эмоциональная устойчивость (средний уровень нейротизма, СН), 15 и более баллов – эмоциональная неустойчивость (высокий уровень нейротизма, ВН).

При помощи автоматического тонометра «Omron» MX3 Plus (Япония) измерялись следующие индикаторы состояния сердечно-сосудистой системы: частота сердечных сокращений (ЧСС,

уд.·мин⁻¹), систолическое (САД, мм рт. ст.) и диастолическое (ДАД, мм рт. ст.) артериальное давление крови. Пульсовое давление крови (ПД, мм рт. ст.), среднее кровяное давление (СКД, мм рт. ст.) рассчитывали по формулам [2]. Измерение показателей ССС проводилось в состоянии покоя в положении сидя.

При проведении эксперимента в качестве звуковых волн были использованы:

1. классическая музыка – Моцарт, Соната ре мажор, в которой представлены звуки в диапазоне наиболее оптимальных для организма человека частот от 400 до 3 000 Гц;

2. «тяжелая» музыка – стиль дэт-металл, Cannibal Corpse, характеризующаяся монотонностью, наличием сверхнизких (15–30 Гц) и сверхвысоких (до 80 000 Гц) частот.

В процессе эксперимента испытуемый прослушивал музыку в течение 15 мин в положении сидя. Интенсивность звучания музыки была в пределах 50–60 db. Измерение исследуемых параметров проводилось до (контроль) и после эксперимента. Экспериментальные группы формировались на основании личностных характеристик в зависимости от половой принадлежности.

Проведенное исследование основано на простой случайной выборке. Были рассчитаны следующие характеристики выборки: выборочное среднее значение (M), стандартная ошибка среднего (m). Статистически значимым считался результат при p меньше 0,05. Проверка законов нормального распределения осуществлялась с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Для проверки гипотезы о наличии различий средних в группах был использован двухсторонний вариант критерия Стьюдента (t), с целью определения степени корреляции параметров ССС и индивидуально-типологических характеристик – непараметрический критерий – коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Для оценки различий экспериментальных данных, полученных в двух разных условиях (КМ и ТМ), на одной и той же выборке испытуемых – парный критерий Т-Вилкоксона. Для обработки данных исследования использовались пакет статистической обработки экспериментальных данных на MS Excel и статистическая программа StatSoft STATISTICA Automated Neural Networks 10 for Windows Ru.

Результаты и обсуждение

Нейротизм или эмоциональная неустойчивость является одним из основных индивидуально-личностных свойств, оказывающих влияние на адаптивные процессы, когнитивные функции, социализацию в обществе. Исследование состояния эмоциональной устойчивости

Таблица 1

Количественное распределение лиц с различным уровнем эмоциональной устойчивости (%)

Уровень	Женщины (n = 188)	Мужчины (n = 168)
Низкий нейротизм	28,72	35,72
Средний нейротизм	25,53	33,33
Высокий нейротизм	45,75	30,95

выявило наличие гендерных особенностей (табл.1). Среди женщин (Ж) преобладает количество студенток с высоким уровнем нейротизма (45,75 %), тогда как наибольшее количество мужчин (М), наоборот, эмоционально более устойчивы (35,72 %) ($p < 0,05$).

Полученные результаты величин показателей ССС организма человека в условиях высоких широт указывают на то, что гендерные различия между группами (табл.2) можно признать значимыми на уровне достоверности ($p < 0,05$). Наиболее высокое значение САД, отражающее величину ударного объема сердца и общего периферического сопротивления сосудов, выявляется у мужчин с НН и составляет $124,1 \pm 2,33$ мм рт.ст. Самое низкое значение САД ($100,38 \pm 2,35$ мм рт.ст.) отмечается у женщин с ВН.

Поддержание относительного постоянства внутренней среды организма у Ж, в отличие от М, вероятно, обеспечивается более высокой ЧСС и пониженным сопротивлением периферических сосудов. Независимо от половой принадлежности, наиболее низкая величина СКД, которая отражает степень эластичности сосудов, выявляется у эмоционально неустойчивых людей.

Результаты исследований влияния различной музыки на параметры ССС человека в зависимости от состояния эмоциональной напряженности выявляют гендерные различия (рис.1). Прослушивание КМ оказывает наиболее значимые

Таблица 2

Показатели состояния сердечно-сосудистой системы у лиц с различным уровнем эмоциональной устойчивости и экстраверсии ($M \pm m$)

Показатель	Женщины	Мужчины	p
Низкий уровень нейротизма			
САД, мм рт. ст.	$107,8 \pm 2,12$	$124,1 \pm 2,33$	$< 0,001$
ДАД, мм рт. ст.	$68,8 \pm 1,24$	$72,4 \pm 1,45$	$= 0,032$
ПД, мм рт. ст.	$39,1 \pm 1,13$	$51,7 \pm 1,05$	$< 0,001$
СКД, мм рт. ст.	$81,6 \pm 1,67$	$89,58 \pm 1,32$	$< 0,001$
ЧСС, ударов/мин	$81,5 \pm 1,21$	$77,31 \pm 1,27$	$< 0,05$
Средний уровень нейротизма			
САД, мм рт. ст.	$108,9 \pm 2,26$	$122,7 \pm 2,06$	$< 0,001$
ДАД, мм рт. ст.	$69,4 \pm 1,23$	$74,7 \pm 1,17$	$< 0,05$
ПД, мм рт. ст.	$41,5 \pm 2,21$	$48 \pm 2,64$	$< 0,001$
СКД, мм рт. ст.	$82,6 \pm 1,14$	$90,7 \pm 1,36$	$< 0,05$
ЧСС, ударов/мин	$81,8 \pm 1,57$	$84,3 \pm 1,46$	$= 0,021$
Высокий уровень нейротизма			
САД, мм рт. ст.	$100,38 \pm 2,35$	$115,7 \pm 2,12$	$< 0,001$
ДАД, мм рт. ст.	$67,1 \pm 1,04$	$71,1 \pm 1,13$	$< 0,05$
ПД, мм рт. ст.	$33,28 \pm 1,24$	$44,6 \pm 1,09$	$= 0,024$
СКД, мм рт. ст.	$78,3 \pm 1,44$	$85,97 \pm 1,66$	$< 0,001$
ЧСС, ударов/мин	$80,5 \pm 1,21$	$76,9 \pm 1,17$	$< 0,05$

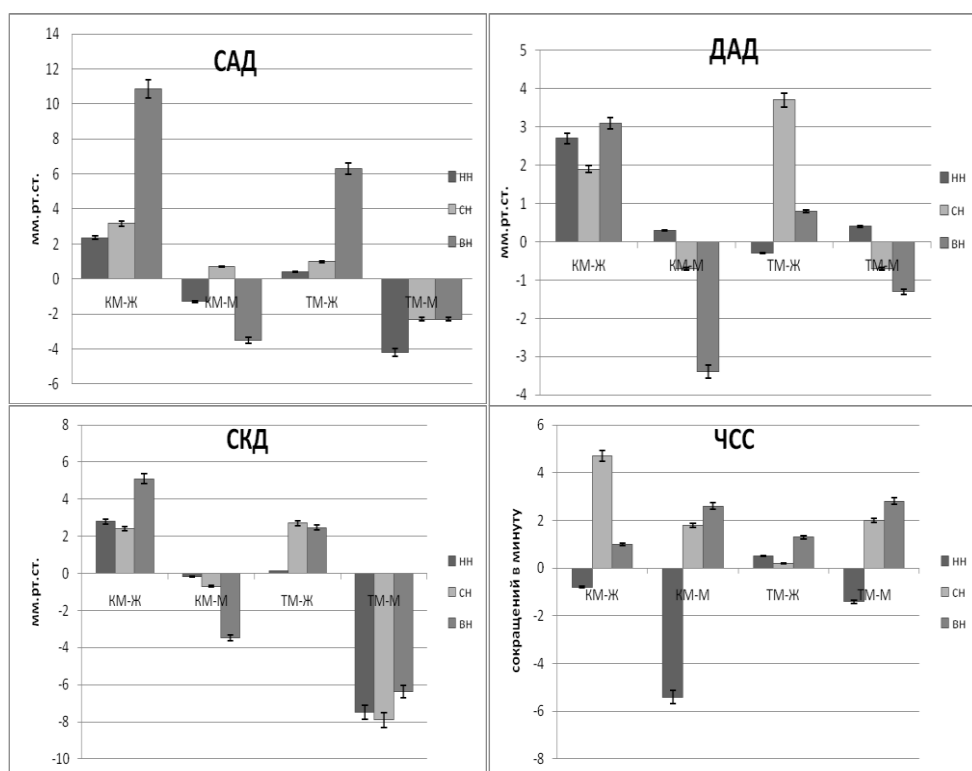


Рис. 1. Величина изменения систолического и диастолического артериального давления, среднего кровяного давления и частоты сердечных сокращений у мужчин и женщин после прослушивания классической и «тяжелой» музыки в зависимости от уровня нейротизма ($p < 0,05$). Остальные объяснения в тексте

воздействия на величину артериального давления у людей с высоким уровнем эмоциональной лабильности. Классическая музыка у Ж вызывает повышение артериального давления, особенно САД в группе с ВН ($p < 0,001$), у которых эта величина была наиболее низкой (табл.2), в результате чего повышается СКД до средних величин ($p = 0,014$). У мужчин с ВН Соната Моцарта определяет снижение САД ($p = 0,034$), ДАД ($p = 0,045$) и СКД ($p = 0,02$). У М эмоционально устойчивых (НН), имеющих наибольшую величину САД, под воздействием КМ происходит ее снижение и также отмечается уменьшение ($p < 0,05$) ЧСС.

«Тяжелая» музыка имеет противоположно направленное воздействие на М и Ж (рис.1). У женщин происходит активация деятельности ССС, независимо от их психоэмоционального состояния ($p < 0,05$), кроме ДАД у Ж-НН ($p = 0,032$). У М, наоборот, после прослушивания ТМ снижаются ($p < 0,05$) показатели ССС, кроме ЧСС у мужчин, имеющих ВН и СН ($p < 0,05$), и ДАД у М-НН ($p = 0,036$), показатели которых увеличиваются (рис.1).

Влияние музыки на ССС человека в зависимости от уровня экстраверсии свидетельствует о различающихся ответных реакциях организма (рис.2).

У женщин-экстравертов прослушивание КМ вызывает повышение СКД, и, особенно, САД ($p < 0,05$), но снижение ДАД. У женщин-интровертов все параметры ($p < 0,05$) возрастают. У М прослушивание Сонаты ре мажор Моцарта вызывает снижение величины всех параметров. ТМ вызывает одинаковую ответную реакцию со стороны ССС у М и Ж интровертов: повышение величины всех параметров ($p < 0,05$). У экстравертов, наоборот, происходит снижение величины всех параметров, кроме САД у Ж ($p < 0,01$).

Звуковые волны при прослушивании музыки могут оказывать влияние на организм через эмоциональное восприятие, повышающее активность симпатoadреналовой системы. И это особенно ярко выражено у Ж, у которых происходит активация ССС. Кроме того, половые и индивидуально-личностные различия наблюдаемых изменений параметров ССС можно объяснить эффектом резонанса, связанного с совпадением частоты воздействия КМ и ТМ с частотой собственных колебаний организма как на уровне высших корково-подкорковых центров, так и на более низких уровнях, в частности, на уровне ретикулярной формации мозга.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что индивидуально-типологический и психоэмоциональный статус че-

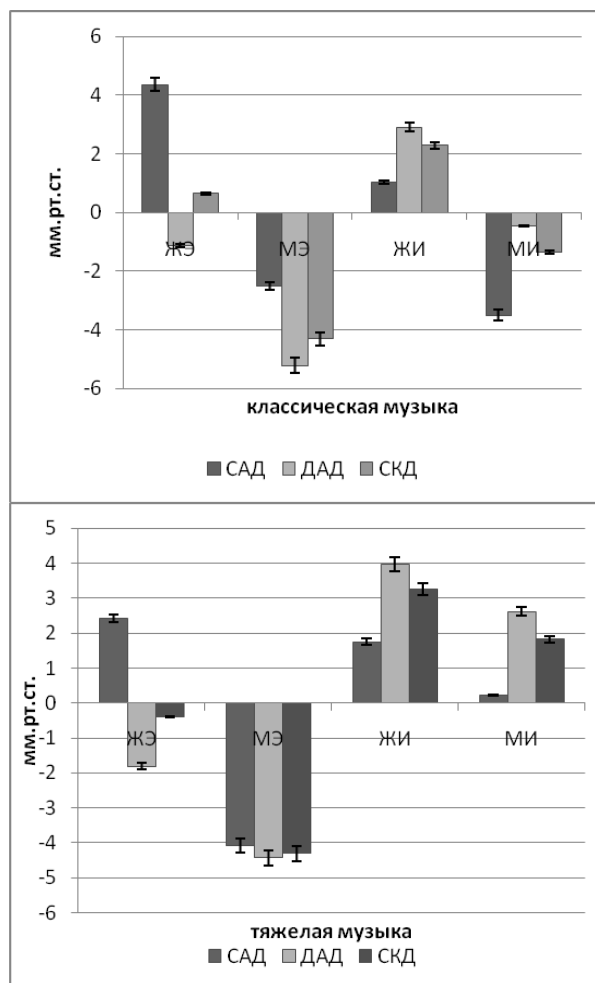


Рис. 2. Величина изменения систолического и диастолического артериального давления, среднего кровяного давления у мужчин и женщин после прослушивания классической и «тяжелой» музыки в зависимости от уровня экстраверсии ($p < 0,05$). ЖЭ – женщины-экстраверты, МЭ – мужчины-экстраверты, ЖИ – женщины-интроверты и МИ – мужчины-интроверты

ловека оказывает влияние на восприятие классической музыки, имеющей различный звуко-частотный, темпоритмичный диапазон, гаммическую и мелодическую структуру или «тяжелой» музыки, которая характеризуется отсутствием гармоник и наличием монотонности (ТМ) посредством изменения, прежде всего, вегетативной регуляции ССС. Наиболее чувствительны к звуковым волнам женщины, а также мужчины с высоким уровнем нейротизма, что, вероятно, обусловлено повышенной активностью лимбической системы на фоне снижения контроля со стороны коры больших полушарий.

Литература

1. Айзенк Г.Ю. Классические IQ тесты. – М.: ЭКСМО-Пресс, 2001. – 192 с.

2. Виноградова Т.С. Инструментальные исследования сердечно-сосудистой системы (справочник). – М.: Медицина, 1986. – 416 с.
3. Гуменюк В.А., Семенова Я.С., Судаков К.В. Электрофизиологические и вегетативные показатели эмоционального восприятия человеком динамичной цветомузыки // Физиология человека. – 2002. – №1. – С. 57–67.
4. Дергаева И.А., Урванцев Л.П. Влияние музыки на больных с пограничными нервно-психическими расстройствами // Ярославский психологический вестник. – М.; Ярославль, 2003. – Вып. 10. – С. 153–160.
5. Костюченко А.Л., Костин Э.Д., Курыгин А.А. Энтеральное искусственное питание в интенсивной медицине. – СПб.: Спецлит, 1996. – 332 с.
6. Николаева Е.Н., Колосова О.Н., Яковлева А.П., Мельгуй Н.В. Некоторые психофизиологические особенности здоровья студентов на Севере и возможность их коррекции // Вестник СВФУ. – 2012. – Т. 9, № 4. – С.25–32.
7. Рыжов Ю.Н. Влияние темпоритмической структуры музыки на психофизиологическое состояние человека // Психотехнологии в социальной работе / Под ред. В. В. Козлова. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – Вып. 10. – С. 203–208.
8. Свищерская Н.Е., Королькова Т.А. Влияние свойств нервной системы и темперамента на пространственную организацию ЭЭГ // Журнал высшей нервной деятельности. – 1996. – Т.46, №5. – С.849–858.
9. Сергиенко Е.А., Виленская Г.А. Роль темперамента в развитии регуляции поведения // Психологический журнал. – 2001. – Т.22, № 3. – С. 68–85.
10. Суворов Г.А., Прокопенко Л.В. Акустические колебания: шум, инфразвук, ультразвук эколого-гигиеническая оценка и контроль. – М., 2000. – 216 с.
11. Шушарджан С. В. Музыкотерапия. Музыка-терапия и резервы человеческого организма. – М., 1998. – 145 с.
12. Hughes J., Daaboul Y., Fino J., Shaw G. The Mozart effect on epileptiform activity // Clin. Electroencephalogr. – 1998. – Vol. 29, N.3. – P. 109–119.
13. Kim S. J. The Effects of Music on Pain Perception of Stroke Patients During Upper Extremity Joint Exercises // Journal of Music Therapy. – 2005. – Vol. 42, N.1. – P. 81–92.
14. Lane R., McRae K., Reiman E. et al. Neural correlates of heart rate variability during emotion // NeuroImage. – 2009. – Vol. 44, N. 1. – P. 213–222.
15. Timmers M., Fischer A., Manstead A. S. R. Gender differences in motives for regulating emotions // Personality and Social Psychology Bulletin. – 1998. – № 24. – P. 974–985.
16. Wahbeh H., Calabrese C., Zwickey H. Binaural beat technology in humans: a pilot study to assess psychologic and physiologic effects // J. Altern Complement Med. – 2007. – Vol. 13, N.1. – P. 25–32.

Поступила в редакцию 05.10.2015

Общая биология

УДК 581.143.6: 633.36

Морфогенез эспарцета песчаного *in vitro* и его регуляция с помощью гуминовых кислот торфа и нанобиокомпозитов

О.А. Рожанская*, Н.В. Барашкова**, Т.В. Шилова*, В.Г. Дарханова**, Н.С. Строева**

*Сибирский НИИ кормов СО РАН, г. Новосибирск

**Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Изучено влияние минерального состава питательных сред и новых стимуляторов роста из растительного сырья на морфогенез эспарцета (Onobrychis arenaria (Kit.) DC) в культуре тканей in vitro. Новые стимуляторы роста из растительного сырья, введенные в состав питательных сред для рекуррентной регенерации и микроклонального размножения эспарцета в концентрации 0,5–1 мг/л, влияют на морфогенез и позволяют заменять дорогостоящие синтетические цитокинины и ауксины, сократить сроки культивирования in vitro в 1,5–2 раза, увеличить выход побегов и частоту ризогенеза на

*РОЖАНСКАЯ Ольга Александровна – д.б.н., зав. лаб.; **БАРАШКОВА Наталья Владимировна – д. с.-х. н., зав. лаб., BNW-07@yandex.ru; *ШИЛОВА Татьяна Васильевна – с.н.с.; **ДАРХАНОВА Валентина Гаврильевна – н.с.; **СТРОЕВА Наталья Семеновна – н.с.

2. Виноградова Т.С. Инструментальные исследования сердечно-сосудистой системы (справочник). – М.: Медицина, 1986. – 416 с.
3. Гуменюк В.А., Семенова Я.С., Судаков К.В. Электрофизиологические и вегетативные показатели эмоционального восприятия человеком динамичной цветомузыки // Физиология человека. – 2002. – №1. – С. 57–67.
4. Дергаева И.А., Урванцев Л.П. Влияние музыки на больных с пограничными нервно-психическими расстройствами // Ярославский психологический вестник. – М.; Ярославль, 2003. – Вып. 10. – С. 153–160.
5. Костюченко А.Л., Костин Э.Д., Курыгин А.А. Энтеральное искусственное питание в интенсивной медицине. – СПб.: Спецлит, 1996. – 332 с.
6. Николаева Е.Н., Колосова О.Н., Яковлева А.П., Мельгуй Н.В. Некоторые психофизиологические особенности здоровья студентов на Севере и возможность их коррекции // Вестник СВФУ. – 2012. – Т. 9, № 4. – С.25–32.
7. Рыжов Ю.Н. Влияние темпоритмической структуры музыки на психофизиологическое состояние человека // Психотехнологии в социальной работе / Под ред. В. В. Козлова. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – Вып. 10. – С. 203–208.
8. Сви́дeрская Н.Е., Королькова Т.А. Влияние свойств нервной системы и темперамента на пространственную организацию ЭЭГ // Журнал высшей нервной деятельности. – 1996. – Т.46, №5. – С.849–858.
9. Сергиенко Е.А., Виленская Г.А. Роль темперамента в развитии регуляции поведения // Психологический журнал. – 2001. – Т.22, № 3. – С. 68–85.
10. Суворов Г.А., Прокопенко Л.В. Акустические колебания: шум, инфразвук, ультразвук эколого-гигиеническая оценка и контроль. – М., 2000. – 216 с.
11. Шушарджан С. В. Музыкотерапия. Музыка-терапия и резервы человеческого организма. – М., 1998. – 145 с.
12. Hughes J., Daaboul Y., Fino J., Shaw G. The Mozart effect on epileptiform activity // Clin. Electroencephalogr. – 1998. – Vol. 29, N.3. – P. 109–119.
13. Kim S. J. The Effects of Music on Pain Perception of Stroke Patients During Upper Extremity Joint Exercises // Journal of Music Therapy. – 2005. – Vol. 42, N.1. – P. 81–92.
14. Lane R., McRae K., Reiman E. et al. Neural correlates of heart rate variability during emotion // NeuroImage. – 2009. – Vol. 44, N. 1. – P. 213–222.
15. Timmers M., Fischer A., Manstead A. S. R. Gender differences in motives for regulating emotions // Personality and Social Psychology Bulletin. – 1998. – № 24. – P. 974–985.
16. Wahbeh H., Calabrese C., Zwickey H. Binaural beat technology in humans: a pilot study to assess psychologic and physiologic effects // J. Altern Complement Med. – 2007. – Vol. 13, N.1. – P. 25–32.

Поступила в редакцию 05.10.2015

Общая биология

УДК 581.143.6: 633.36

Морфогенез эспарцета песчаного *in vitro* и его регуляция с помощью гуминовых кислот торфа и нанобиокомпозитов

О.А. Рожанская*, Н.В. Барашкова**, Т.В. Шилова*, В.Г. Дарханова**, Н.С. Строева**

*Сибирский НИИ кормов СО РАН, г. Новосибирск

**Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Изучено влияние минерального состава питательных сред и новых стимуляторов роста из растительного сырья на морфогенез эспарцета (Onobrychis arenaria (Kit.) DC) в культуре тканей in vitro. Новые стимуляторы роста из растительного сырья, введенные в состав питательных сред для рекуррентной регенерации и микроклонального размножения эспарцета в концентрации 0,5–1 мг/л, влияют на морфогенез и позволяют заменять дорогостоящие синтетические цитокинины и ауксины, сократить сроки культивирования in vitro в 1,5–2 раза, увеличить выход побегов и частоту ризогенеза на

*РОЖАНСКАЯ Ольга Александровна – д.б.н., зав. лаб.; **БАРАШКОВА Наталья Владимировна – д. с.-х. н., зав. лаб., BNW-07@yandex.ru; *ШИЛОВА Татьяна Васильевна – с.н.с.; **ДАРХАНОВА Валентина Гаврильевна – н.с.; **СТРОЕВА Наталья Семеновна – н.с.

15–90%. При этом эффективность антисептической обработки семян эспарцета с помощью смеси этанола и перекиси водорода достигает 97%, лабораторная всхожесть асептических семян – 72%. Разработаны протоколы рекуррентной регенерации с участием нанобиокмпозитов как заменителей синтетических фитогормонов. Новые селекционные биотехнологии предназначены для создания высокопродуктивных и долговечных форм эспарцета, устойчивых к условиям криолитозоны.

Ключевые слова: эспарцет песчаный, *in vitro*, рекуррентная регенерация, регуляторы роста, нанобиокмпозиты.

Morphogenesis of the *Onobrychis Arenaria* In Vitro and Its Control by Using Peat Humic Acids and Nano-Biocomposites

O.A. Rozhanskaya*, N.V. Barashkova**, T.V. Shilova*, V.G. Darkhanova**, N.S. Stroevea**

*Scientific Research Institute of Fodder SB RAS, Novosibirsk

**Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The influence of a mineral composition of the nutrient solutions and new growth stimulants from a vegetable origin raw materials on the morphogenesis of Onobrychis arenaria in a culture of the tissue in vitro studied. The new growth stimulants from a vegetable origin raw materials, which were put into composition of the nutrient media for the recurrent regeneration and the micro-cloning multiplication of the onobrychis in concentration 0.5–1 mg/l, have an effect on the morphogenesis and permit to change the expensive synthetical cytokinins and the auxins, reduce the cultivation's time in vitro in 1.5–2 times, increase the appearance of the scions and the frequency of rhizogenesis by 15–90%. The effectiveness of the antiseptic treatment of the seeds of the onobrychis with a mixture of ethanol and hydrogen dioxide achieves 97 % and the germination of the aseptical seeds under laboratory conditions is 72 %.

The protocols of the recurrent regeneration with nano-biocomposites as the alternatives of the synthetical plant hormones are worked out. The new selection biological technologies are applicable for creation of highly productive and longeval forms of onobrychis, which are resistant in conditions of the cryolithic zone.

Key words: onobrychis arenaria, *in vitro*, recurrent regeneration, regulators of the growth, nano-biocomposites.

Введение

Изучение особенностей морфогенеза *in vitro* кормовых растений, широко распространённых в естественных ценозах Якутии и пригодных к хозяйственному использованию, позволяет применять селекционные биотехнологии в направлении повышения адаптивности.

Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC) относится к особо ценным кормовым травам, поскольку кормовая масса его богата белком и не вызывает тимпанита у скота, растение устойчиво к засухе, толерантно к солонцеватым и щелнистым почвам с бедным минеральным составом. Однако произрастающий на лугах и в редколесьях Якутии эспарцет сибирский (*Onobrychis sibirica* (Širj.) Turcz. ex Grossh. [1], по нашим наблюдениям, не отличается долголетием, имеет небольшую надземную массу, а плоды его быстро осыпаются по мере созревания. В Якутии нет сортов эспарцета, адаптированных к условиям криолитозоны.

Для формирования популяций растений-регенерантов мы используем технологию рекуррентной регенерации, обеспечивающую отбор на

устойчивость к абиотическим и биотическим повреждающим факторам [2]. Эффективность автоселекции адаптивных генотипов растёт с увеличением числа пассажей [3]. Данная технология предусматривает чередование регенерационных циклов и микроклонального размножения, поэтому сроки создания популяций, пригодных для селекции, зависят от частоты реализации морфогенеза и продолжительности пассажа. Основной циклического процесса также может послужить вторичная регенерация из каллусов, сформировавшихся у оснований побегов в процессе клонирования первичных регенерантов [4].

Цель исследований – разработка и совершенствование методик культивирования *in vitro* эспарцета для создания высокопродуктивных и долговечных форм, устойчивых к условиям криолитозоны. Поставленные задачи включают изучение влияния новых стимуляторов роста из растительного сырья как химических факторов, инициирующих и стимулирующих определённые типы морфогенеза в эксплантах тканей эспарцета.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментов *in vitro* использовали семенной материал эспарцета песчаного СибНИИК 30 и сложногибридных популяций соматклонов СГП-11, СГП-12, СГП-13. Семена, очищенные от плодовых оболочек, дезинфицировали и проращивали на безгормональных питательных средах. Асептические растения служили источником эксплантов для каллусообразования и регенерации. Ткани инкубировали при 16-часовом фотопериоде, освещенности 2000 лк, температуре 21°C. Применяли питательные среды с минеральным составом по Гамборгу (B5) или Мурасиге-Скугу (MS) [5,6]. Фитогормоны и экспериментальные регуляторы роста добавляли в питательную среду перед автоклавированием.

Новый биостимулятор ГКst, предоставленный лабораторией агроэкологии Томского государственного педагогического университета – водный раствор высокомолекулярных веществ из стандартного образца торфа 1S103H (США) с концентрацией гуминовых кислот 0,1% [7]. Регуляторы роста – нанобиокомпозиты разработаны и изготовлены в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН методами механохимической активации растительного сырья: КЛ – из коры лиственницы, МП05 – из хвои пихты, аминокумат АГ12 – из бурого угля с добавкой соевого белка [8–10].

Опыты имели 3 повторности во времени, объем выборки в каждом варианте составлял 20–30 эксплантов. Различия средних оценивали с помощью критерия Фишера или непараметрических критериев статистики [11].

Результаты и обсуждение

Опыт 1. Изучено влияние минерального состава питательных сред на морфогенез проростков из асептических семян эспарцета (табл. 1). На среде MS всхожесть была выше на 10%, чем на среде Гамборга половинного состава (1/2B5), однако выход асептических растений снижался из-за повышенной частоты инфекции. Скорость роста и развития побега была несколько выше на среде 1/2B5. Поскольку эта среда содержит значительно меньше солей и углеводов, чем MS, её использование представляется более выгодным в экономическом отношении.

Опыт 2. Сравнительное изучение влияния синтетического цитокинина БАП и препарата ГКst проведено в культуре тканей листовых и корневых эксплантов эспарцета (табл. 2). На среде MS без экзогенных регуляторов роста (контроль) морфогенные структуры в листовых тканях не формировались, хотя средний объем экспланта увеличился более чем вдвое. В тканях

Т а б л и ц а 1

Влияние минерального состава питательной среды на прорастание семян эспарцета *in vitro* после дезинфекции (период инкубации 26 сут)

Показатели морфогенеза	Питательная среда	
	1/2B5	MS
Всхожесть, %	68	78
Доля инфицированных проростков, %	7	12
Высота побега, см	7,4±0,6	6,0±0,5*
Число листьев на побег	2,4±0,2	2,3±0,2
Длина корня, см	4,8±0,3	5,0±0,3

*Разница средних арифметических достоверна на 5%-м уровне значимости.

Т а б л и ц а 2

Влияние цитокинина БАП и препарата из торфа ГКst на морфогенез в тканях листовых и корневых эксплантов эспарцета *in vitro* (период инкубации 35 сут)

Показатели морфогенеза	MS без добавок (контроль)		MS + БАП 0,5 мг/л		MS + ГКst 1 мл/л	
	Лист	Корень	Лист	Корень	Лист	Корень
Происхождение экспланта						
Частота каллусогенеза, %	0	40	93	100	7	33
Объем каллуса, см ³	0	0,3	0,07	0,4	0,003	0,3
Объем экспланта по отношению к исходному, %	266	373	100	100	210	515
Частота регенерации, %	0	13	40	33	0	0
Число регенерантов на эксплант	0	1,0	2,3	3,0	0	0

корневого происхождения, напротив, обнаружена довольно высокая эндогенная биологическая активность: почти половина эксплантов приступила к каллусогенезу, причём на каждом третьем каллусе начался спонтанный эмбриогенез и возникло растение-регенерант.

В присутствии БАП почти все листовые экспланты сформировали каллус, в котором с частотой 40% происходил эмбриогенез и развивались 2–3 растения-регенеранта. Корневые ткани на среде с БАП увеличили частоту каллусогенеза до 100%, частоту регенерации в – 2,5 раз, число регенерантов на эксплант – втрое. Препарат ГКst в культуре листовых тканей продемонстрировал слабую морфогенную активность, вызвав образование небольших каллусов с частотой 7%, причём регенерация отсутствовала, как на безгормональной среде. В культуре корневых тканей добавка ГКst, очевидно, препятствовала действию эндогенных регуляторов роста, снизив частоту каллусообразования и исключив регенерацию.

Интересно, что при некотором сходстве морфогенных ответов на БАП и ГКst в отношении каллусогенеза и регенерации обнаружилось различие их действия на объём экспланта, а именно: эндогенные гормоны вызывали увеличение объёма, БАП блокировал этот процесс, а препарат ГКst стимулировал рост объёма корневых эксплантов. Поскольку увеличение размеров экспланта обусловлено эффектом растяжения клеток, присущим ауксинам, можно предположить ауксиновую активность у препарата ГКst. Очевидно, в эндогенном комплексе корневых тканей эспарцета при наличии ауксинов преобладают цитокинины.

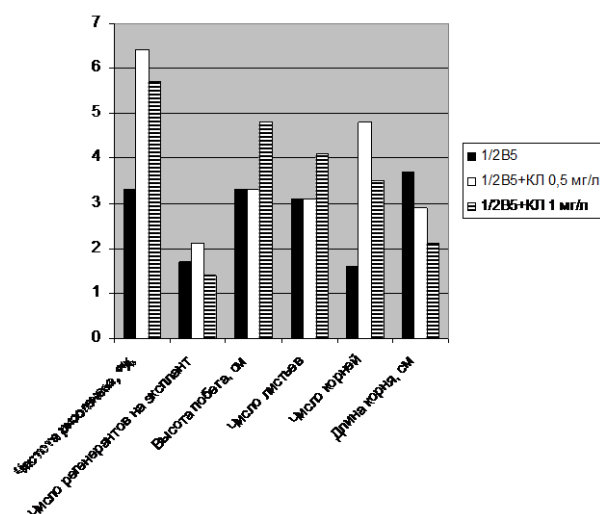
Опыт 3. Изучено влияние нанобиокомпозиата из коры лиственницы КЛ на развитие эмбрионов эспарцета из листового каллуса в течение 6 недель (рисунок). Наиболее значимым эффектом препарата явилось повышение частоты ризогенеза почти вдвое, а также увеличение количества растений-регенерантов на 24% и числа корней втрое под действием добавки КЛ в дозе 0,5 мг/л. Удвоенная доза препарата способствовала повышению частоты ризогенеза на 68% по сравнению с безгормональной средой, ускорению роста побегов и развития листьев и корней на 45, 32 и 119% соответственно.

Таким образом, использование в составе питательной среды препарата из коры лиственницы в концентрации 0,5–1 мг/л сокращает сроки культивирования эспарцета *in vitro* в 1,5–2 раза.

Опыт 4. Проведено сравнительное изучение влияния двух регуляторов роста: синтетического ауксина НУК (α -нафтилуксусная кислота) и препарата МП05 на развитие почек эспарцета в процессе микроклонального размножения (табл. 3). Добавки НУК и МП05 в дозе 1 мг/л увеличили количество развивающихся побегов на 20 и 30% соответственно, способствуя появлению новых адвентивных побегов.

Естественно, средняя высота побегов и количество листьев при этом уменьшились. Кроме того, оба препарата в первый месяц снизили вдвое частоту ризогенеза по сравнению с безгормональной средой. Очевидно, в биологической системе почек эспарцета *in vitro* нанобиокомпозиат МП05 в изученной дозе проявил активность ауксинового типа и пригоден для замены НУК. Анализ результатов эксперимента также показал, что второй месяц культивирования незначительно увеличивает показатели морфогенеза, поэтому целесообразно 1-месячные безкорневые побеги эспарцета со среды с добавкой МП05 пасировать на безгормональную среду для укоренения.

Опыт 5. Изучение влияния аминоксидата АГ12 проводили посредством добавления препарата



Влияние нанобиокомпозиата КЛ на развитие эмбрионидов эспарцета из листового каллуса (период инкубации 6 недель)

Т а б л и ц а 3

Влияние ауксина НУК и нанобиокомпозиата МП05 на развитие побегов из почек эспарцета *in vitro*

Показатели морфогенеза	1/2B5 без гормонов (контроль)		1/2B5 +НУК 1 мг/л		1/2B5 + МП05 1 мг/л	
	25	60	25	60	25	60
Период инкубации, сут	25	60	25	60	25	60
Число побегов на эксплант	1,0	1,1	1,2*	1,3*	1,3*	1,4*
Высота побега, см	3,8	5,6	3,0*	3,9*	3,2*	3,8*
Число листьев на побег	2,4	3,8	1,6*	3,1*	1,4*	3,0*
Частота ризогенеза, %	40	67	21*	61	21*	31*
Число корней на эксплант	1,6	3,6	1,8	4,1	4,0*	4,1
Длина корня, см	1,9	2,4	4,0*	6,0*	1,5	3,7*

*Разница средних арифметических с контролем достоверна на 5%-м уровне значимости.

перед автоклавированием в питательную среду 1/2B5 в концентрации 1 мг/л. В качестве эксплантов использовали почки асептических растений эспарцета в фазе розетки. Результаты представлены в табл. 4.

Препарат достоверно стимулировал индукцию ризогенеза, увеличив его частоту на 15% и обеспечив за 1,5–2 месяца полное укоренение побегов. Кроме того, под действием аминоксидата достоверно повысилась на 10% облиственность растений и на 9% их высота.

Таким образом, применение АГ12 в дозе 1 мг/л позволяет ускорить процесс микроклонального размножения эспарцета и увеличить его эффективность.

Учитывая особенности регуляторной активности препаратов АГ12 и МП05 (табл. 3), для повышения эффективности микроклонального раз-

Т а б л и ц а 4

Влияние нанобиокомпозита АГ12 на развитие побегов из почек эспарцета *in vitro*

Показатели морфогенеза	1/2B5 без добавок (контроль)		1/2B5 + АГ12 1 мг/л	
Период инкубации, сут	27	58	27	58
Число побегов на эксплант	1,0	1,1	1,0	1,1
Высота побега, мм	58	60	53	65
Число листьев на побег	4,5	7,3	4,4	8,1*
Частота ризогенеза, %	45	85	55*	100*
Число корней на эксплант	3,3	3,5	3,0	3,3
Длина корня, мм	27	21	17*	22

*Разница средних арифметических с контролем достоверна на 5%-м уровне значимости.

множения эспарцета можно рекомендовать следующий протокол:

- 1) 1-месячная инкубация эксплантов почек на среде 1/2B5 с добавкой МП05 в дозе 1 мг/л;
- 2) пассирование неукоренённых побегов на среду 1/2B5 с добавкой АГ12 в дозе 1 мг/л.

Выводы

1. Эффективность антисептической обработки семян эспарцета с помощью смеси этанола и перекиси водорода достигает 97%, лабораторная всхожесть асептических семян – 72%.

2. Новые стимуляторы роста из растительного сырья, введённые в состав питательных сред для рекуррентной регенерации и микроклонального размножения эспарцета в концентрации 0,5–1 мг/л, влияют на морфогенез и позволяют заменять дорогостоящие синтетические цитокинины и ауксины, сократить сроки культивирования *in vitro* в 1,5–2 раза, увеличить выход побегов и частоту ризогенеза на 15–90%.

3. Для повышения эффективности микроклонального размножения эспарцета рекомендуется следующий протокол: 1-месячная инкубация эксплантов почек на среде 1/2B5 с добавкой МП05 в дозе 1 мг/л с последующим пассирова-

нием неукоренённых побегов на среду 1/2B5 с добавкой АГ12 в дозе 1 мг/л.

Литература

1. Черепанов С.К. Сосудистые растения СССР. – Л.: Наука, 1981. – 510 с.
2. Рожанская О.А. Создание исходного материала для селекции кормовых культур в условиях Сибири с помощью методов биотехнологии: Автореф. дис. ... д.б.н. – СПб., 2007. – 33 с.
3. Рожанская О.А., Дарханова В.Г., Строева Н.С. Автоселекция *in vitro* эспарцета песчаного на адаптивность // Сиб. вест. с-х. науки. – 2011. – №3–4. – С. 131–134.
4. Рожанская О.А., Дарханова В.Г., Строева Н.С. и др. Особенности регуляции морфогенеза эспарцета и люцерны *in vitro* // Сиб. вест. с-х. науки. – 2008. – №5. – С. 58–65.
5. Gamborg O.L. Nutrient requirement of suspension cultures of soybean root cell / O.L. Gamborg, R.A. Miller, K. Ojima // Exp. Cell Res. – 1968. – V. 50. – P. 151–158.
6. Murashige T. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures / T. Murashige, F. Skoog // Physiol. plant. – 1962. – V. 15. – P. 473–497.
7. Рожанская О.А., Инишева Л.И., Ларина Г.В. Характеристика биологической активности препаратов гуминовых кислот торфов в культуре тканей растений // Сиб. вест. с-х. науки. – 2013. – №3. – С. 20–27.
8. Korolev K.G., Lomovskij O.I., Rozhanskaya O.A., Vasil'ev V.G. Mechanochemical preparation of water-soluble forms of triterpene acids // Chem. Natural compounds. – 2003. – 39:4. – P. 366–372.
9. Патент РФ № 2267927. Биостимулятор роста растений / К.Г. Королев, О.И. Ломовский, О.А. Рожанская. – Оpubл. в Б.И. – 2006. – № 2.
10. Дарханова В.Г., Строева Н.С., Королев К.Г. и др. Применение нанобиокомпозитов для стимуляции роста растений *in vitro* / Материалы II Международного форума по нанотехнологиям (Москва, 6–8 октября 2009 г.) <http://rusnanotech09.rusnanoforum.ru/cgi-bin/show.pl?option=&id=&lang=ru>.
11. Сорокин О. Д. Прикладная статистика на компьютере. – Краснообск: ГУП РПО СО РАСХН, 2004. – 162 с.

Поступила в редакцию 25.03.2015

Структурно-морфологический подход как способ точной идентификации онтогенетических состояний плотнодерновинных злаков (на примере *Festuca lenensis* Drob.)

С.Н. Андреева, М.М. Черосов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Рассмотрена целесообразность применения структурно-морфологического подхода для решения существующих проблем идентификации онтогенетических состояний плотнодерновинных злаков на примере *Festuca lenensis*. В онтогенезе *Festuca lenensis* установлены четыре периода и десять онтогенетических состояний, представлены биологические критерии и морфологические характеристики онтогенетических состояний вида. Структурно-морфологический анализ побегов и побеговых систем *Festuca lenensis* проведен с использованием трех категорий модулей: выделены 3 элементарных, 2 универсальных и 2 основных типа. Для вида установлен изомодульный тип структуры, обусловленный однотипностью как универсальных, так и основных модулей. Показано, что с развитием особи происходит накопление однотипных модулей и усложнение структурной организации, при этом каждый этап данного повторяющегося процесса соответствует определенному онтогенетическому состоянию. Данный способ актуален для идентификации онтогенетических состояний особей прегенеративного периода и является значительно упрощенным по сравнению с существующей процедурой определения онтогенетических состояний. С использованием структурно-морфологического подхода уточнены критерии выделения виргинильного состояния плотнодерновинного злака – появление побегов III порядка, формирование системы парциальных кустов (ОМ1).

Ключевые слова: онтогенез, архитектурные модели, плотнодерновинные злаки, ценопопуляции, онтогенетические состояния, элементарный модуль, универсальный модуль, основной модуль.

Structural-Morphological Approach as the Way of Correct Identification of Ontogenetic Stages of Thick-Root Bunch Grasses (Case Study of *Festuca Lenensis* Drob.)

S.N. Andreyeva, M.M. Cherosov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The practicability of application of the structural-morphological approach to resolving the existing problems of the identification of ontogenetic stages of thick-root bunch grasses on the example of *Festuca lenensis* is shown. For *Festuca lenensis* ontogenesis 4 periods and 10 ontogenetic stages are revealed, biological criteria and morphological characteristics of the ontogenetic stages of the species are presented. Structural-morphological analysis of *Festuca lenensis* shoots and shoot systems is conducted using three categories of modules. Three elementary, two universal and 2 basic types of modules are identified. For the species the izomodular type of structure have been revealed, due to the uniformity of both universal and basic modules. It is shown that with the development of individuals, the same type of modules accumulates and the structural organization becomes more complex. At the same time each stage of this iterative process corresponds to a particular ontogenetic stage. This method is relevant for identification of ontogenetic stage of individuals in pregenerative period and is significantly simplified compared to the existing procedure for determination of ontogenetic stages. Using the structural-morphological approach the selection criteria of virginile stage of thick-root bunch grasses such as an emergence of shoots of III order and formation of a system of partial bunches (system basic module 1) are found out.

Key words: ontogenesis, architecture models, thick-root bunch grasses, cenopopulations, ontogenetic stages, elementary module, universal module, basic module.

Введение

Онтогенез плотнoderновинных злаков рассмотрен многими исследователями, обзоры работ которых приведены и обобщены в монографиях [1–3]. Но, несмотря на изученность онтогенеза плотнoderновинных злаков, остаются вопросы, касающиеся выбора биоморфологических критериев при переходе особей из одного состояния в другое. При описании онтогенеза видов рода *Festuca* L. Г.Н. Гордеева [4] и Р.А. Балдаева [5] отметили особь ювенильной после разворачивания второго листа и развития придаточных корней. Выделение имматурного периода у плотнoderновинных злаков большинство авторов связывает с началом кущения – с появлением побегов II–III порядков. Одним из трудных вопросов является переход из имматурного в виргинильное состояние, т.к. в большинстве работ приводятся только количественные размеры дерновины, более точно начало виргинильного состояния отмечено Р.А. Балдаевой [5] и приурочено к появлению побегов IV порядка. При описании онтогенеза *Psathyrostachys caespitosa* A.A. Скобелева [6] выделила имматурное состояние с появлением у особи побегов II порядка и виргинильное состояние с появлением у особи побегов III и IV порядков. Разделение состояний генеративного периода основывается на количественных показателях живой и отмершей частей дерновины и числа генеративных побегов. Также на количественных показателях живой и отмершей частей дерновины основывается выделение онтогенетических состояний постгенеративного периода.

Таким образом, наиболее трудным вопросом остается переход особей плотнoderновинных злаков из имматурного в виргинильное состояние. Для устранения данных проблем, по нашему мнению, целесообразно пользоваться современными принципами структурно-морфологического подхода, что и предпринято в данной работе.

Материалы и методика

Изучение морфогенеза побегов в ходе онтогенеза проводилось с использованием общепринятых методик и подходов [1,2,7–9]. Строение побегов и побеговых систем рассмотрено с учетом трех категорий модулей [10–11]:

- 1) элементарный метамер (элементарный модуль);
- 2) одноосный или моноподиальный побег, возникший из одной апикальной меристемы (универсальный модуль);
- 3) побеговая система, представленная первичным или парциальным кустом, возникшим из ряда меристем (основной модуль).

Нами для описания онтогенеза *Festuca lenensis* за основу взят онтогенез данного вида, описан-

ный Р.А. Балдаевой [5]. У изученного вида выделены возрастные периоды и состояния, характерные для многих многолетних травянистых растений:

I – латентный – семена (*se*);

II – прегенеративный – проростки (*p*), ювенильные растения (*j*), имматурные растения (*im*), виргинильные (*v*);

III – генеративный – молодые генеративные (*g*₁), средневозрастные генеративные (*g*₂) и старые генеративные растения (*g*₃);

IV – постгенеративный – субсенильные растения (*ss*) и сенильные (*s*).

В качестве счетной единицы выступали особи семенного происхождения, для растений генеративного и постгенеративного возрастного состояния – компактный клон. При выделении возрастных групп учитывали размеры и число побегов и листьев на них; форму и размеры дерновин; количественные соотношения генеративных и вегетативных, живых и мертвых побегов.

Результаты и обсуждение

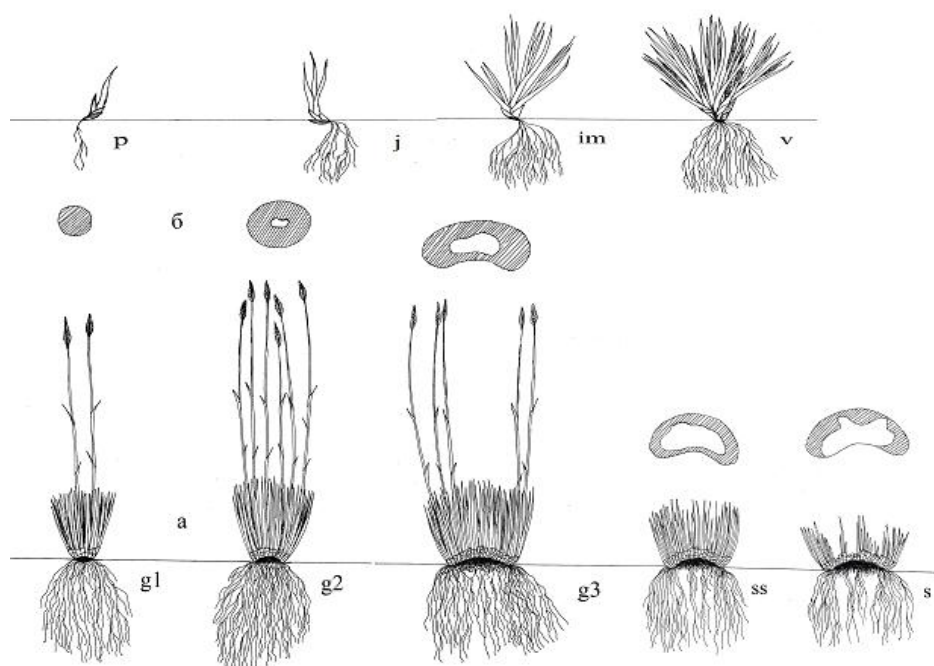
Полный онтогенез *Festuca lenensis* включает четыре периода и десять онтогенетических состояний. Общая схема онтогенеза *Festuca lenensis* представлена на рисунке.

Латентный период у овсяницы ленской представлен семенами. Семена – зерновки, удлинённые, 3–4 мм в длину, при благоприятных условиях (достаточный уровень увлажнения, наличие «свободного» пространства – выбоин и т.п.) прорастают сразу после осыпания.

Прегенеративный период. Проростки имеют coleoptиль, предлист и один ассимилирующий лист. Длина листовой пластинки 2 см. Проростки имеют один зародышевый корень длиной 4 см.

Ювенильное состояние начинается с появлением второго зеленого листа, совпадающим с развитием двух придаточных корней на гипокотиле [5]. Ювенильные растения представлены одноосным побегом с 3–5 листьями. Высота побега 5,3 см. Длина корня 2,7 см.

Имматурные растения. За начало имматурного состояния принято начало кущения. Кущение – появление первого побега второго порядка II¹ из влагалища 1-го листа главного побега. В это время главный побег имеет 4–5 листьев. По мере роста на растении формируется до 3–4 побегов второго порядка, число листьев на побеге II¹ достигает 3–4, на побеге II² – 2, на побегах II³ и II⁴ – 1. Таким образом, в имматурном состоянии формируется первичный куст. Высота главного побега 6,3 см. Средняя длина побега II¹ составляет 3,8 см. Длина корневой системы 3,5 см.

Общая схема онтогенеза *Festuca lenensis*.

Условные обозначения: *p*, *j*, *im*, *v*, *g1*, *g2*, *g3*, *ss*, *s* – онтогенетические состояния; *a* – вид особи спереди; *b* – схема дерновины, где заштрихованная область – живая часть дерновины, белая область – омертвевшая часть

Виргинильные растения. В качестве признака выделения виргинильного состояния Р.А. Балдаева [5] относит появление побегов IV порядка, нами же выделение данного состояния приурочено ко времени появления побегов III порядка, т.к. с началом кущения побегов II порядка формируется новое структурное образование – сложный куст, как система парциальных кустов, образованных побегами II порядка. К моменту появления побегов III порядка средняя высота главного побега составляет 9,5 см, сам побег насчитывает 7 листьев. Кроме этого, растение имеет до 4 побегов II порядка, т.е. формируется сложный куст. В корневой системе насчитывается до 16–25 корней длиной до 12–15 см.

К концу виргинильного периода растение представляет собой небольшую, но четко выраженную компактную дерновину с диаметром 0,5–0,8 см, состоящую из 5–6 парциальных кустов. Главный побег формирует до 9–10 листьев. В дерновине, в среднем, насчитывается до 7–8 побегов II порядка, число листьев которых достигает 3–8, и 5–10 побегов III порядка с 2–5 листьями. Появляются 2–3 побега VI порядка с 2–3 листьями.

Генеративный период. Важным критерием для подразделения генеративного периода на отдельные возрастные состояния является число генеративных побегов. У особей *Festuca lenensis* годы обильного образования генеративных по-

бегов чередуется с 3–5-летним периодом их малочисленности или отсутствия. В годы отсутствия генеративных побегов в качестве критерия выделения онтогенетических состояний генеративного периода особенно актуальны такие признаки, как размеры дерновины и соотношение в ней живых и мертвых частей.

Нами предпринята попытка проверки объективности дифференциации 556 особей *Festuca lenensis*, ранее выделенных нами по традиционным подходам выделения онтогенетических состояний генеративного периода с использованием дискриминантного анализа, при котором на уровне значимости дискриминантной

функции $p < 0,01$ ($F_{расч} = 32,3$; $F_{крит} = 24,1$) данные признаки являлись максимально сильными. Из всего объема выборки 43 особи были классифицированы как *g1*, 473 – как *g2*, 34 – *g3*, и только 6 особей, ранее субъективно выделенных как *g2*, были отнесены к другим группам. Таким образом, объективность дифференциации особей составила 98–100%.

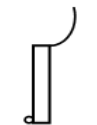
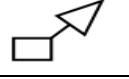
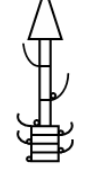
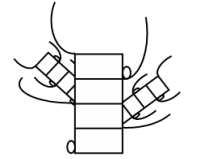
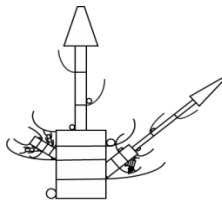
Молодые генеративные растения. Появление первого генеративного побега свидетельствует о начале генеративного периода. Дерновина в диаметре 2 см. Наблюдается слабое проявление процессов отмирания, в центральной части дерновины отмечаются базальные части отмерших побегов I, II порядков. Генеративных побегов немного, в среднем насчитывается 5–6, длина их около 35,5 см.

Средневозрастные генеративные растения. В данном состоянии отмечается максимальное развитие генеративной и вегетативной сфер. Значительно увеличивается число генеративных побегов – до 25 (в среднем), вегетативных – до 80. Диаметр дерновины в среднем до 4 см и приобретает выпуклую форму. Часть дерновины начинает отмирать.

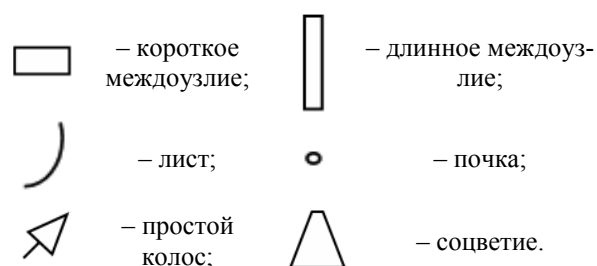
Старые генеративные растения имеют рыхлую, но пока еще единую дерновину. Но при этом дернины у них имеют неправильную форму, чаще всего вытянуто-овальную или дугообразную, а также меньшее число генеративных

Т а б л и ц а 1

Модули плотнoderновинного злака *Festuca lenensis*

Тип модуля	Рисунок	Описание
Элементарные модули (ЭМ)		
ЭМ1		Короткое междоузлие с листом и почкой
ЭМ2		Длинное междоузлие с листом и почкой
ЭМ3		Междоузлие с простым колосом
Универсальные модули (УМ)		
УМ1		Вегетативный розеточный побег
УМ2		Генеративный полурозеточный побег
Основные модули (ОМ)		
ОМ1		Система вегетативных розеточных побегов
ОМ2		Система вегетативных розеточных и генеративных полурозеточных побегов

Условные обозначения:



побегов (от 2–4 до 15–19), расположенных в периферии дернины. Также уменьшается высота генеративных побегов. Начинается процесс партикуляции. В этом возрастном состоянии уже процессы отмирания преобладают над новообразованием побегов.

Постгенеративный период. В постгенеративном периоде выделено два онтогенетических состояния – субсенильное и сенильное.

Субсенильные растения. Переход к субсенильному состоянию определяется утерей способности к цветению. Дерновина субсенильного клона имеет вытянутую форму длиной до 6 см и шириной до 1 см и состоит из двух–трех партикул. Число вегетативных побегов в партикуле, в среднем, составляет 17 шт. Корневая система слабо развита.

Сенильные растения представляют собой отдельную партикулу, имеющих небольшое число вегетативных побегов с укороченными листьями. Большая часть партикулы состоит из отмерших побегов.

Тип онтогенеза *Festuca lenensis* относится к В типу II надтипу по классификации Л.А. Жуковой [3].

Структурно-морфологический анализ побегов и побеговых систем *Festuca lenensis* проведен с использованием трех категорий структурно-элементарных единиц – модулей: элементарного, универсального и основного (табл. 1).

Элементарный модуль (ЭМ) – элементарный метамер (фитомер) плотнoderновинного злака представлен тремя типами, выделенными в зависимости от расположения в определенной зоне генеративного побега. В зоне возобновления ЭМ 1 состоит из короткого междоузлия, листа и почки, в зоне торможения ЭМ 2 – из длинного междоузлия, листа срединной формации и почки, в зоне обогащения ЭМ 3 – из междоузлия и простого колоса (табл. 1).

Универсальный модуль (УМ) – одноосный побег представлен двумя типами побегов: вегетативным розеточным и генеративным полурозеточным. При этом вегетативный розеточный побег (УМ 1) состоит из элементарных модулей зоны возобновления (ЭМ 1) и является побегом с неполным циклом, т.е. представляет этап развития генеративного полурозеточного побега. Генеративные полурозеточные побеги (УМ 2) состоят из элементарных модулей трех типов, являются монокарпическими, ди- и полициклическими (табл. 1).

Совокупность универсальных модулей составляет основной модуль (ОМ) – первичный куст (ОМ1) или система побега кущения с базисимподиальным нарастанием побегов (ОМ 2) (табл. 1).

В своем максимальном развитии (в среднегенеративном состоянии) плотнoderновинный злак представляет совокупность ОМ 2 как системы УМ 1 и УМ 2.

Таким образом, исследованный вид характеризуется однотипностью модулей (как универ-

сального, так и основного) – изомодульным типом структуры [12]. С развитием особи происходит накопление однотипных модулей, что ведет к усложнению структурной организации: УМ1 (первичный одноосный побег) – итерация (увеличение числа УМ1) – ОМ1 (первичный куст) – итерация (увеличение ОМ1) – ОМ2 (система парциальных кустов). При этом каждый этап накопления и усложнения структурных единиц соответствует определенному этапу онтогенетического состояния (табл. 2).

Использование структурно-морфологического подхода позволяет нам обобщить онтогенез плотнoderновинных злаков, в особенности, данный способ актуален для идентификации онтогенетических состояний особей прегенеративного периода, т.к. является значительно упрощенным и объективным по сравнению с существующей процедурой определения биоморфологических критериев.

Заключение

Таким образом, полный онтогенез *Festuca lenensis* включает четыре периода и десять онтогенетических состояний. Основные фазы онтоморфогенеза объекта исследования соответствуют таковым для биоморфы плотнoderновинных растений, обобщенных Л.А. Жуковой [3].

Структурно-морфологический анализ побегов и побеговых систем плотнoderновинных злаков показал, что с развитием особи происходит накопление однотипных модулей, что ведет к усложнению структурной организации. При этом каждый этап данного повторяющегося процесса соответствует определенному онтогенетическому состоянию. Данный способ актуален для идентификации онтогенетических состояний особей прегенеративного периода и является значительно упрощенным по сравнению с существующей процедурой определения биоморфологических критериев. С использованием структурно-морфологического подхода уточнены критерии выделения виргинильного состояния плотнoderновинного злака – появление побегов III порядка, формирование системы парциальных кустов (ОМ1).

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0376-2014-002: тема 52.1.11. «Разнообразие растительного мира таежной зоны Якутии: структура, динамика, сохранение» и при поддержке гранта РФФИ 12-04-98533 *р восток а «Популяционная биология степных растений Якутии».*

Литература

1. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). – М.: Наука, 1976. – 217 с.
2. Серебрякова Т.И. Модели побегообразования и

Таблица 2

Структурно-морфологическая характеристика особей различного онтогенетического состояния *Festuca lenensis*

Онтогенетические состояния	Категория и тип модули	Число накопленных модулей
<i>p</i>	УМ1	1 УМ1 ^I (1–2 ЭМ1)*
<i>j</i>	УМ1	1 УМ1 ^I (3–5 ЭМ1)
<i>im</i>	ОМ1	1 ОМ1 (1 УМ1 ^I (5–6 ЭМ1) + 1–3 УМ1 ^{II} (1–4 ЭМ1))
<i>v</i>	Система ОМ 1	2–10 ОМ1 (1 УМ1 ^I (7–10 ЭМ1) + 4–8 УМ1 ^{II} (5–7 ЭМ1) + 1–10 УМ1 ^{III} (2–5 ЭМ1) + 2–4 УМ1 ^{IV} (1–2 ЭМ1))
<i>g</i>	Система ОМ 2	В зависимости от состояния
<i>ss</i>	Система ОМ 1	То же
<i>s</i>	Система ОМ 1	«

*Формула 1 УМ 1^I (1–2 ЭМ 1): число побегов (УМ 1) I порядка (число метамеров (ЭМ 1) побега).

некоторые пути эволюции в роде *Gentiana* L. // Бюл. МОИП. Отд. биол. – 1979. – Т. 84, вып. 6. – С. 97–109.

3. Жукова Л.А. Популяционная жизнь луговых растений. – Йошкар-Ола: РИИК «Ланар», 1995. – 224 с.

4. Гордеева Г.Н. Биоморфологические особенности и структура ценопопуляций *Festuca pseudovina* Hackel ex Wiesb. в Хакасии: Автореф. дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 2005. – 15 с.

5. Балдаева Р.А. Биоэкологические особенности, география и таксономия видов рода *Festuca* L. в Байкальской Сибири: Дис. ... к.б.н. – Улан-Удэ, 2000. – 147 с.

6. Скобелева А.А. Онтогенез ломкоколосника дернистого (*Psathyrostachys caespitosa* (Suka-czev) Peschikova) // Онтогенетический атлас растений: Научное издание. Т. VII. – Йошкар-Ола, 2013. – С. 251–260.

7. Работнов Т.А. Жизненный цикл многолетних травянистых растений в луговых ценозах // Труды БИН АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – Вып. 6. – С. 7–204.

8. Серебряков И.Г. Морфология вегетативных органов высших растений: Учебное пособие. – М.: Советская наука, 1952. – 392 с.

9. Уранов А.А. Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов // Биологические науки. – 1975. – №2. – С. 7–34.

10. Савиных Н.П. Биоморфология вероник России и сопредельных государств: Автореф. дис. ... д.б.н. – М., 2000. – 450 с.

11. Курченко Е.И. Род полевица (*Agrostis* L., сем. Poaceae) России и сопредельных стран. Морфология, систематика и эволюционные отношения. – М.: Прометей, 2010. – 516 с.

12. Марков М.В. Структура и популяционная биология малолетних растений центра Русской равнины: Автореф. дис. ... к.б.н. – М., 1992. – 35 с.

Поступила в редакцию 24.06.2015

Длительность выращивания многолетних травянистых растений в Якутском ботаническом саду

Н.С. Данилова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

При оценке интродукционных возможностей растений одним из критериев, определяющих устойчивость вида в культуре, является длительность его выращивания. Выделены следующие группы по длительности выращивания растений в коллекции: высокоустойчивые в культуре виды, находящиеся в составе коллекции в течение 25 и более лет без вмешательства человека в его размножение; устойчивые виды, длительность существования которых в коллекции обеспечивается вмешательством человека – проведением ежегодных посевов или искусственным вегетативным размножением; неустойчивые в культуре виды, существующие в коллекции менее 5 лет, не дающие потомства и не способные в условиях коллекционного питомника к воспроизводству даже при помощи человека.

Ключевые слова: интродукция, ботанический сад, коллекция, длительность выращивания, самовозобновление, интродукционная устойчивость.

Duration of Cultivation of Herbaceous Perennial Plants in the Yakutsk Botanical Garden

N.S. Danilova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

When assessing plants introduction abilities, one of the criteria determining the sustainability of a species in the culture is the duration of its cultivation. The plants have been classified into the following groups depending on the duration of their cultivation in the collection: highly sustainable species that have been a part of the collection without human intervention in its reproduction for 25 or more years; sustainable species whose longevity in the collection is supported by human intervention – annual seedlings or artificial vegetative propagation; unstable species that have been a part of the collection for less than 5 years and have been unable to reproduce even under the conditions of a nursery with the help of a human.

Key words: introduction, botanical garden, collection, duration of cultivation, self-reproduction, introduction sustainability.

Введение

Сохранение в течение многих лет декоративных качеств многолетних травянистых растений обуславливает их успешное практическое применение в зеленом строительстве и является одной из важнейших его характеристик при создании долговременных ландшафтных композиций. Поэтому представляется интересным изучение длительности выращивания многолетников в коллекциях ботанического сада.

Определение «длительность выращивания растения» включает в себя два различных понятия: продолжительность жизни особи-интроду-

цента и продолжительность выращивания образца в коллекции. Первое, как правило, является видовой характеристикой и генетически обусловлено. Многолетние интродукционные испытания дают возможность проследить у ряда видов полный жизненный цикл, но зачастую определение продолжительности жизни растения представляет некоторые трудности. Особенно это связано с видами, хорошо самовозобновляющимися как вегетативно, так и семенным путем. Как справедливо замечает Б.Н. Головкин [1], в этом случае существует вероятность завысить истинный возраст растения. Второе понятие

более широкое, длительность выращивания образца охватывает как абсолютный возраст интродуцента, так и сменяющие друг друга поколения интродуцентов [2].

Пункт интродукции и условия интродукционного эксперимента

Многолетний интродукционный эксперимент проведен на базе коллекции травянистых растений природной флоры Якутии Якутского ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Сад расположен в окр. г. Якутска, на второй надпойменной террасе р. Лены. Природные условия типичны для Центральной Якутии. Коллекция была заложена в 1966 г., недалеко от подножья коренного берега Чучур-Муран, на этом месте ранее была распространена разнотравно-типчаковая степь.

Привлечение растений в ботанический сад осуществлялось в ходе многочисленных экспедиционных поездок в разные районы Якутии. Состав коллекции динамичен. На протяжении многих лет на фоне длительно выращиваемых образцов в коллекционном фонде наблюдается постоянное движение растительного материала – поступают новые виды и образцы, выпадают неустойчивые.

Растения высажены в опытные делянки размером 1 x 1 м², объединенные в кварталы. В ходе эксперимента все растения, независимо от их экологической приуроченности, выращиваются в одинаковых условиях, на обычном агротехническом фоне. Со дня основания коллекционный питомник не перестраивался, но с увеличением количества поступающего растительного материала раздвигаются его границы. Растения растут на первоначально выделенных делянках, что дает возможность проследить у интродуцентов продолжительность жизни, выделить среди них долгоживущие особи и образцы, наблюдать смену возрастных онтогенетических состояний.

Обсуждение результатов

Длительность существования растений в культуре определяется продолжительностью онтогенеза и способностью вида к семенному и вегетативному размножению. Соответственно, всё разнообразие интродуцентов по длительности существования в коллекции можно подразделить на три группы:

1. Виды, находящиеся в составе коллекции в течение 25 лет и более без вмешательства человека в его размножение:

- самовозобновляющиеся в культуре долголетники, жизненный цикл которых составляет более 25 лет. Динамика численности интродукционных популяций этих видов положительна;

– неспособные к самовозобновлению в культуре долголетники, жизненный цикл которых составляет более 25 лет. Численность интродукционных популяций постоянна в течение ряда лет или имеет отрицательный баланс;

– виды с меньшей продолжительностью жизни, активно самовозобновляющиеся семенным путем и вегетативно. Численность интродукционных популяций этих видов ежегодно устойчиво повышается.

2. Виды, длительность существования которых в коллекции обеспечивается вмешательством человека – проведением ежегодных посевов или искусственным вегетативным размножением.

Это обычно малолетники и многолетники с небольшим жизненным циклом, плодоносящие с разной степенью интенсивности, но не самовозобновляющиеся ни семенным путем, ни вегетативно. Сохранение таких видов в коллекции требует помощи человека.

3. Виды, существующие в коллекции менее 5 лет, не дающие потомства и не способные в условиях коллекционного питомника к воспроизводству даже при помощи человека.

Виды, одновременно обладающие как продолжительным онтогенезом, так и способностью к семенному или вегетативному самоподдержанию интродукционных популяций, являются наиболее устойчивыми в культуре. Широкий онтогенетический спектр интродукционных популяций, который формируется благодаря постоянному пополнению за счет самосева или вегетативного размножения, обуславливает жизнеспособность и длительное существование образца в культуре. В коллекции ЯБС наиболее типичный представитель этого варианта – высокоустойчивый в культуре *Adonis sibirica* Patr. ex Ledeb., вид, сокращающий численность популяций, внесенный в Красную книгу РС(Я) [3]. Впервые в коллекцию *A. sibirica* был привлечен в 1970 г. живыми растениями, собранными в устье р. Буотама (Центральная Якутия). Эти исходные материнские растения существуют в питомнике до настоящего времени, не проявляя признаков старения. В литературе имеются сведения о высокой продолжительности жизни *A. sibirica*, по Е.Л. Нухимовскому [4], стародубка сибирская в природных условиях достигает максимального развития примерно к 60 годам. Наши наблюдения подтверждают это утверждение, в онтогенетическом спектре интродукционной популяции до настоящего времени не отмечены особи старого генеративного и сенильного возрастного состояния. В культуре *A. sibirica* высокоустойчив, ежегодно цветет и плодоносит, образует обильный самосев, существуя на грани сорничания.

Динамика численности интродукционной популяции положительная, обусловлена возникновением новых особей семенного происхождения и безостановочным переходом их из одного возрастного состояния в другое. Первое цветение стародубки в культуре отмечается на 3-й год жизни, но фактический переход в генеративное состояние происходит в конце вегетационного периода второго года жизни, когда полностью сформирован зачаточный цветочный побег будущего года развития. Здесь будет уместным отметить, что при переносе в культуру ответной реакцией на агротехнический фон и уменьшение конкурентного влияния является ускорение темпов начальных этапов онтогенеза. Развитие у интродуцентов происходит настолько интенсивно и быстро, что из их онтогенеза выпадают некоторые возрастные состояния и можно говорить о неполноте онтогенетического спектра интродукционных популяций. У одних видов (*Adonis sibirica*) наблюдается переход из имматурного возрастного состояния в генеративное, минуя виргинильное [5], у других (*Pulsatilla flavescens* (Zucc.) Juz., *Linum komarovii* Juz.) из ювенильного онтогенетического состояния особи сразу переходят в виргинильное, пропуская имматурное [6, 7]. При этом в интродукционных популяциях переход особей из одного возрастного состояния в другое осуществляется одновременно. Так, при сравнительном изучении онтогенеза 4 видов лука (*Allium prostratum* Trev., *A. ramosum* L., *A. schoenoprasum* L. и *A. splendens* Willd. ex Schult. et Schult.) в природе и культуре в условиях питомника был отмечен дружный переход всех молодых вегетативных особей в генеративное состояние на второй год жизни. Объяснением этому факту служат как отсутствие в культуре фитоценотического пресса, так и агротехнические мероприятия. В природе такого явления не наблюдается, переход осуществляется растянуто, в течение нескольких лет. Самое раннее зацветание отмечено у отдельных экземпляров *A. schoenoprasum* и *A. splendens* всего лишь на четвертый год, у *A. prostratum* и *A. ramosum* на пятый. Кроме того, что это происходит позднее, процесс перехода растягивается на несколько лет, т.е. особи вступают в генеративное состояние в разном календарном возрасте.

Также длительное существование растений обеспечивается способностью растений к вегетативному самовозобновлению. Этим качеством обладают длиннокорневищные, ползучие, стелющиеся и корнеотпрысковые растения (высокоустойчивые в культуре *Thermopsis jacutica* Czefr., *Fragaria orientalis* Losinsk., *Phlox sibirica* L., *Chamerion latifolium* (L.) Holub). В благоприятных условиях коллекционного питомника на

влажных рыхлых почвах интенсивность вегетативного разрастания этих растений резко повышается, обычно растения выходят за рамки отведенных им площадок. Поэтому при использовании таких видов в декоративных посадках необходим контроль за процессом разрастания.

Уязвим вариант, когда длительность выращивания обусловлена только продолжительным онтогенезом растения, неспособного к самовозобновлению, ни семенному, ни вегетативному. В этих случаях необходимо проведение посевов (если интродуцент плодоносит) или искусственного вегетативного размножения. Без вмешательства человека эти виды или образцы в коллекции были бы представлены только одной возрастной группой, при этом динамика численности образца имела бы отрицательный баланс, обусловленный отмиранием особей. Если посадки не поддерживать регулярными посевами или вегетативным размножением, нет гарантии, что в случае непредвиденной гибели растений вид не выпадет из состава коллекции. Типичными представителями этого варианта являются в коллекции *Aruncus dioicus* (Walt.) Fern. – волжанка двудомная и *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. – лабазник вязолистный. В коллекции исходные материнские экземпляры этих видов без видимых возрастных морфологических изменений существуют в течение длительного времени, более 30 лет. В культуре устойчивы, ежегодно цветут и плодоносят, самосева не отмечено.

В отличие от них в более устойчивом положении находятся многие виды с непродолжительным онтогенезом – однолетники и малолетники, но способные к самовоспроизводству (высокоустойчивые в культуре *Redowskia sophiifolia* Cham. et Schlecht., *Papaver jacuticum* Peschkova, *Delphinium grandiflorum* var. *grandiflorum* L., *Leptopyrum fumarioides* (L.) Reichenb., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Oxytropis scheludjakovae* Karav. et Jurtz. и др., жизненный цикл которых составляет от 1 до 10 лет). Суммарный возраст сменяющихся поколений этих видов составляет несколько десятилетий. Обычно это стержнекорневые растения, непродолжительная жизнь которых компенсируется способностью к надежному воспроизводству, в данном случае, семенному. Для них характерны высокая семенная продуктивность, интенсивный устойчивый самосев. Обильный урожай семян обеспечивает достаточный запас семян в почве, семена постепенно прорастают, поддерживая численность популяции.

Интенсивность самоподдержания интродукционных популяций у разных видов неодинакова. Одни виды способны сохранять численность популяции примерно на одном уровне с небольшими колебаниями (подъемами и сниже-

ниями) в разные годы, другие проявляют слабую, но устойчивую положительную динамику численности, третьи активно самовозобновляются, интенсивно увеличивая количество особей, переходя в категорию сорничающих. *Hesperis sibirica* L. – вечерница сибирская, произрастает в центральных и юго-западных районах Якутии. В 1968 г. семена собраны на разнотравном лугу на острове Хатыстах в окр. г. Якутска. Стержнекорневой розеточный гемикриптофит. Продолжительность онтогенеза в культуре 3–4 года, цветет на второй год жизни. Образует обильный самосев, в онтогенетическом спектре интродукционной популяции представлены все возрастные состояния. Численность вида в коллекции положительно динамична, и на протяжении 45 лет определяется высоким урожаем семян, ежегодным самосевом, устойчивым их развитием и переходом особей из одной возрастной группы в другую. В последнее десятилетие численность интродукционной популяции *H. sibirica* сильно возросла и поэтому мы вынуждены корректировать её в сторону уменьшения. Это тем более необходимо, т.к. увеличение численности вида сопровождается процессом натурализации. *H. sibirica* начинает выходить за пределы коллекционного питомника (пока на небольшое расстояние) и внедряться в состав природных ценозов.

Особую группу составляют однолетние сорные растения, которые из года в год, несмотря на проводимые агротехнические мероприятия, активно размножаются. Семена сорных растений прорастают в течение всего вегетационного сезона, снова и снова восстанавливая численность пропалываемых сорняков. Ярким примером таких сорных однолетников является *Lamium purpureum* L. Вид на территории Якутии отмечен только в верхнем течении р. Лены, где проходит северо-восточная граница его ареала, в Центральной Якутии не отмечен. Был включен в первое издание республиканской Красной книги [8]. В коллекции представлен с 1983 г., семена собраны на залежи в дер. Кочегарово Олекминского района. В коллекции ежегодно, в течение 30 лет самовозобновляется. С учетом того, что *L. purpureum* – сорное растение, площадь экспонирования вида в коллекции постоянно с первых лет интродукции корректируется. Но при этом надо отметить, что сорные растения в определенной степени являются стенотопными и в сильной степени привязаны к возделываемым территориям, в отличие от дикорастущих видов.

Вместе с тем среди интродуцентов достаточно плодоносящих малолетников и многолетников, неспособных к самовозобновлению. Без поддержки человека они, как правило, выпадают из состава коллекции по причине естественной гибели

ли в результате старения. Сохранение этих растений в коллекции в ряде случаев не представляет трудностей и поддержание численности интродукционной популяции возможно путем проведения регулярных посевов. В составе коллекции подобным образом в течение более 40 лет выращиваются *Pulsatilla turczaninowii* Kryl. et Serg., *P. multifida* (G. Pritz.) Juz. и др. Но в некоторых случаях посевы оказываются безуспешными из-за семян низкого качества или иных причин, и тогда образец или вид выпадают из состава коллекции (*Actaea erythrocarpa* Fisch., *Potentilla asperrima* Turcz., *Primula nutans* Georgi и др.). Какие-то виды оказываются вне поля зрения интродуктора и образцы оказываются утраченными для интродукции. Так произошло с двулетником *Anoplocarum helenae* Volot., редким эндемичным видом Якутии – с уходом куратора коллекции не были своевременно проведены посевы этого вида.

Внимания заслуживают виды неустойчивые и слабоустойчивые, с непластичной экологической природой, погибающие в течение первых 5 лет жизни в условиях интродукции. Перенос многих тундровых, лесных растений в коллекционный питомник Якутского ботанического сада происходит с большими трудностями – нарушается пригнанность вида к привычным условиям естественных местообитаний. На невысокие интродукционные возможности тундровых растений также указывал Г.Н. Андреев [9], объясняя это относительным консерватизмом тундровых растений, обладающих малым диапазоном изменчивости. То же самое можно сказать и о лесных травах. Резкая смена природных условий при переносе в питомник негативно сказывается на состоянии растений. Как правило, они способны только вегетировать, отсутствие плодоношения свидетельствует не только о неспособности образца самостоятельно поддерживать численность, но и затрудняет помощь человека. В большинстве случаев такие интродуценты обречены на гибель.

На основании изложенного можно считать длительность выращивания растений в составе коллекции одним из критериев, определяющих устойчивость вида в культуре.

Работа выполнена в рамках базового проекта фундаментальных исследований СО РАН на 2013–2016 гг. VI.52.1.11. «Разнообразие растительного мира таежной зоны Якутии: структура, динамика, сохранение».

Литература

1. Головкин Б.Н. Переселение травянистых многолетников на Полярный Север. Эколого-морфологический анализ. – Л.: Наука, 1973. – 266 с.

2. Трулевич Н.В. Эколого-фитоценоотические основы интродукции растений. – М.: Наука, 1991. – 215 с.
3. Красная книга Республики Саха (Якутия). Т.1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / Мин-во охраны природы РС (Я), Департамент биологических ресурсов. – Якутск: НИПК «Сахаполиграфиздат», 2000. – 256 с.
4. Нухимовский Е.Л. Экологическая морфология некоторых лекарственных растений в естественных условиях их произрастания. 10. *Adonis sibirica* Patr. ex Ledeb. // Растительные ресурсы. – 1980. – Вып.2. – С. 250–256.
5. Данилова Н.С., Борисова С.З., Иванова Н.С., Афанасьева Е.А. Редкие растения окрестностей города Якутска. – Новосибирск: Наука, 2012. – 103 с.
6. Данилова Н.С., Борисова С.З. Онтогенез *Pulsatilla flavescens* (Ranunculaceae) в условиях интродукции в Центральной Якутии // Растительные ресурсы. – 2010. – Вып. 2. – С. 13–18.
7. Семенова В.В., Данилова Н.С. Характеристика ценопопуляций *Linum komarovii* (Linaceae) в Центральной Якутии // Растительные ресурсы. – 2014. – №3. – С. 431–442.
8. Красная книга Якутской АССР. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений / Отв. ред. д.б.н. В.Н. Андреев. – Новосибирск: Наука, 1987. – 248 с.
9. Андреев Г.Н. Растения природной флоры СССР в условиях культуры на Кольском полуострове // Ботанические исследования за Полярным кругом. – Апатиты: Изд.-во Кольского филиала АН СССР, 1969. – С. 3–15.

Поступила в редакцию 13.08.2015

УДК 635.9: 58.006

Интродукция рода *Spiraea* L. в Центральной Якутии

Т.С. Коробкова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приведены данные о видовом составе рода *Spiraea* L. в Якутии и его интродукции в Якутском ботаническом саду. Всего испытано 23 вида, 5 форм. 10 видов совмещают устойчивость с высокими декоративными качествами. 5 видов представлены местной флорой и имеют ранний и средний фенологический ритм. *Spiraea media*, *S. dahurica*, *S. sericea* относятся к весенне-цветущей группе спирей. Изученные инорайонные виды, *S. betulifolia* и *S. salicifolia*, относятся к среднему и позднему феноритму и являются летне-цветущими. Среди них выделяется *S. chamaedrifolia*, которая занимает промежуточное положение. Среди изученных видов спирей большинство относится к мезоксерофитам и только спирей иволистная – мезогигрофитам. На изменчивость морфологических признаков влияют влагообеспеченность и освещенность места произрастания спирей. Высокая степень изменчивости проявлялась во влажных местообитаниях и отмечалась для признаков габитуса куста и соцветия. Неприхотливость к почвенным условиям, зимостойкость и высокая декоративность позволяют широко использовать спирею в озеленении.

Ключевые слова: виды спирей, фенологические фазы, морфологическая изменчивость, декоративные качества.

The Introduction of Genus *Spiraea* L. in Central Yakutia

T.S. Korobkova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The data on the species composition of the genus *Spiraea* L. in Yakutia and its introduction into the Yakut Botanical Garden are presented. Totally 23 species, 5 forms are tested. 10 species combine highly decorative qualities with the resistance to adverse conditions. 5 species belong to the local flora and have the early and

КОРОБКОВА Татьяна Сергеевна – к.б.н., зав.ботсадом, korobkova_t@list.ru.

2. Трулевич Н.В. Эколого-фитоценоотические основы интродукции растений. – М.: Наука, 1991. – 215 с.
3. Красная книга Республики Саха (Якутия). Т.1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / Мин-во охраны природы РС (Я), Департамент биологических ресурсов. – Якутск: НИПК «Сахаполиграфиздат», 2000. – 256 с.
4. Нухимовский Е.Л. Экологическая морфология некоторых лекарственных растений в естественных условиях их произрастания. 10. *Adonis sibirica* Patr. ex Ledeb. // Растительные ресурсы. – 1980. – Вып.2. – С. 250–256.
5. Данилова Н.С., Борисова С.З., Иванова Н.С., Афанасьева Е.А. Редкие растения окрестностей города Якутска. – Новосибирск: Наука, 2012. – 103 с.
6. Данилова Н.С., Борисова С.З. Онтогенез *Pulsatilla flavescens* (Ranunculaceae) в условиях интродукции в Центральной Якутии // Растительные ресурсы. – 2010. – Вып. 2. – С. 13–18.
7. Семенова В.В., Данилова Н.С. Характеристика ценопопуляций *Linum komarovii* (Linaceae) в Центральной Якутии // Растительные ресурсы. – 2014. – №3. – С. 431–442.
8. Красная книга Якутской АССР. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений / Отв. ред. д.б.н. В.Н. Андреев. – Новосибирск: Наука, 1987. – 248 с.
9. Андреев Г.Н. Растения природной флоры СССР в условиях культуры на Кольском полуострове // Ботанические исследования за Полярным кругом. – Апатиты: Изд.-во Кольского филиала АН СССР, 1969. – С. 3–15.

Поступила в редакцию 13.08.2015

УДК 635.9: 58.006

Интродукция рода *Spiraea* L. в Центральной Якутии

Т.С. Коробкова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приведены данные о видовом составе рода *Spiraea* L. в Якутии и его интродукции в Якутском ботаническом саду. Всего испытано 23 вида, 5 форм. 10 видов совмещают устойчивость с высокими декоративными качествами. 5 видов представлены местной флорой и имеют ранний и средний фенологический ритм. *Spiraea media*, *S. dahurica*, *S. sericea* относятся к весенне-цветущей группе спирей. Изученные инорайонные виды, *S. betulifolia* и *S. salicifolia*, относятся к среднему и позднему феноритму и являются летне-цветущими. Среди них выделяется *S. chamaedrifolia*, которая занимает промежуточное положение. Среди изученных видов спирей большинство относится к мезоксерофитам и только спирей иволистная – мезогигрофитам. На изменчивость морфологических признаков влияют влагообеспеченность и освещенность места произрастания спирей. Высокая степень изменчивости проявлялась во влажных местообитаниях и отмечалась для признаков габитуса куста и соцветия. Неприхотливость к почвенным условиям, зимостойкость и высокая декоративность позволяют широко использовать спирею в озеленении.

Ключевые слова: виды спирей, фенологические фазы, морфологическая изменчивость, декоративные качества.

The Introduction of Genus *Spiraea* L. in Central Yakutia

T.S. Korobkova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The data on the species composition of the genus *Spiraea* L. in Yakutia and its introduction into the Yakut Botanical Garden are presented. Totally 23 species, 5 forms are tested. 10 species combine highly decorative qualities with the resistance to adverse conditions. 5 species belong to the local flora and have the early and

КОРОБКОВА Татьяна Сергеевна – к.б.н., зав.ботсадом, korobkova_t@list.ru.

middle phenological rhythms. *Spiraea media*, *S. dahurica*, *S. sericea* belong to the group of spring-flowering spiraea. The species from other regions, *S. betulifolia* u *S. salicifolia*, have the middle and late phenological rhythms and are summer-blooming. Between them *S. chamaedrifolia* occupies an intermediate position. The variability of morphological features depends on the wetness and lighting of locus spiraea. The most studied species of spiraea are mesoxerophytes and only *S. salicifolia* is a mesohygrophyte. Variability of morphological features is influenced by moisture conditions and illumination of a place of growth of a spiraea. High degree of variability was shown in damp habitats, and it was noted for signs of a gabitus of a bush and an inflorescence. Unpretentiousness to soil conditions, hardiness, high decorative quality of *Spiraea* allow to use it widely in landscaping.

Key words: species of *Spiraea*, phenological phases, morphological variability, decorative qualities.

Введение

Одной из проблем декоративного садоводства в условиях сурового климата является подбор ассортимента используемых растений. Как правило, он основывается на местных видах с небольшим дополнением устойчивых инорайонных видов. Но даже среди этого небольшого разнообразия есть виды, которые, несмотря на декоративность, совмещенную с высокой зимо- и засухоустойчивостью, неприхотливостью, слабо используются в озеленении городов Якутии.

К таким видам относятся виды рода Спирея (Таволга). В природной среде спирея образует заросли из невысоких обильно цветущих кустарников, растущих на открытых местах сосновых, лиственничных, березовых лесов. Не требовательна к влаге и почве, может расти как на берегах рек и речек, в травянистых болотах, так и на каменистых склонах. Как культура спирея используется в озеленении парков и скверов Сибири и Дальнего Востока, центральной части России. Кустарники прекрасно стригутся, держат форму, долговечны.

Род Спирея (*Spiraea* L.) относится к подсемейству *Spiraeoideae* Agardh., являющемуся самым примитивным в семействе *Rosaceae* Juss. [1]. На территории России произрастают 18 видов [2], в Сибири – 16 [3, 4], в Якутии – 9 видов [5]. Фенотипический полиморфизм ряда видов спиреи, приведший к большому разнообразию форм, обусловил трудности в определении таксономического статуса многих видов спиреи. В связи с этим возникла необходимость в изучении внутривидовой изменчивости видов на основании анализа всех таксономически важных признаков, наиболее полно характеризующих таксон. М. Ширманов [6] приводит следующее разделение видов спирей, произрастающих на территории России, на три секции: sect. *Chamaedryon* Ser. – растения с зонтиковидными соцветиями; sect. *Calospira* C. Koch. – растения с щитковидными соцветиями; sect. *Spiraria* Ser. – растения с метельчатыми соцветиями. Большую часть видов составляют виды из секции *Chamaedryon* Ser. – *S. chamaedryfolia*, *S. media*,

S. crenata, *S. litwinovii*, *S. trilobata*, *S. Hypericifolia* и др. Виды из секций *Calospira* C. Koch и *Spiraria* Ser. представлены по 2 вида соответственно.

Материалы и методы исследования

Изучение фенологических фаз развития и роста, хозяйственно-биологических признаков проводили в соответствии с Методикой фенологических наблюдений в ботанических садах СССР [7]. Изменчивость определяли согласно шкале уровней изменчивости С.А. Мамаева [8]. Очень низкий коэффициент вариации – до 7%, низкий – 7–12%, средний – 13–20%, высокий – 21–40%.

В Якутском ботаническом саду (ЯБС) с 1956 г. было испытано 23 вида и 5 форм спиреи [9]. 12 видов вымерзли сразу, 7 видов имели очень низкую морозоустойчивость (V–VI баллов), что делало неперспективным их дальнейшее выращивание.

Результаты и обсуждение

В настоящее время в коллекциях древесно-кустарниковой флоры ЯБС представлены следующие виды спиреи.

Spiraea media Schmidt (С. средняя) – широко распространенный кустарник до 1,5 м высотой с белыми цветками, собранными в пушистые соцветия щитки 0,3–0,5 см в диаметре. Куст состоит от 12 до 52 ветвей, большая часть которых несет цветоносы (рис. 1). Побеги круглые, буроватые, на две трети от вершины покрыты соцветиями. Листья овальные (длина превышает ширину в 2 раза) летом ярко-зеленые, осенью красные, буро-желтые, зеленые. Цветение начинается в начале июня и продолжается 15–20 дней. Встречается во всех, кроме Арктического, районах Якутии. Мезоксерофит, петрофит. Светолюбива, но выносит легкое затенение.

S. salicifolia L. (С. иволистная) – пряморослый кустарник до 1,7 м высотой, побеги красновато-желтые с удлинено-ланцетными, остроконечными листьями сверху темно-зелеными, снизу

Рис. 1. Цветение *S. media*

более светлыми. Цветки розовые собраны на концах побегов в пирамидальные метельчатые соцветия (рис.2). Диаметр соцветия 1,5–2,5 см, длина метелки 5,0–7,5 см. Начинает цвести в конце июня, заканчивает в середине июля. Произрастает во всех районах Якутии, кроме Арктического. Обычна по берегам рек, на заливных лугах, болотах. Мезогигрофит, эутроф, но переносит и бедные почвы [10].

S. sericea Turcz. (С. шелковистая) – прямостоячий высокий кустарник до 2 м высотой, с длинными побегами, покрытыми по всей длине снежно-белыми соцветиями, собранными в зонтики. Под тяжестью своих соцветий они изящно изгибаются к земле, образуя красивую, густую крону округлой формы (рис.3). Листья тонкие, зубчатые (3–5) на вершине, шелковисто-опушенные. Цветет с первой декады июня в течение 10–15 дней. В Якутии встречается в Алданском районе на открытых каменистых склонах. Мезоксерофит, олиготроф, светолюбива.

S. betulifolia Pall. (С. березоволистная) – невысокий (60 см) кустарник с густой шаровидной кроной, побеги ребристые, листья широкояйцевидные, зазубренные. Соцветия – щитковидные или усеченные метелки из большого количества (до 37) цветков белого цвета со слегка кремовым оттенком (рис.4). Цветет в конце июня – начале июля 10–15 дней. Зимостойкость средняя (III балла). Ежегодно подмерзают годовые побеги. В Якутии встречается в Алданском, Центрально-якутском, Яно-Индибирском районах. Мезоксерофит, петрофит. Среднетеневынослива.

S. dahurica (Rupr.) Maxim (С. даурская) – высокий до 1,5 м кустарник. Щитковидные соцветия 0,5–0,7 см в диаметре, с белыми цветками располагаются в верхней части побегов. Цветет с первой декады июня в течение 10–12 дней. Листья цельные, зеленые, в августе приобретают ярко-желтую окраску. В Якутии встречается в Алдан-

Рис. 2. Цветение *S. salicifolia*Рис. 3. Цветение *S. sericea*Рис. 4. Цветение *S. betulifolia*

ском, Верхнеленском, Яно-Индибирском районах. Мезопсихрофит, петрофит. Светолюбива.

S. albiflora (Mig.) Zbl (С. белоцветковая) – невысокий (до 0,5 м) кустарник с острыми продолговатыми листьями и плоскими соцветиями в

виде крупного щитка. Цветки белые, душистые. На веточках соцветия имеют опушение. Цветет в конце июня почти месяц. Ежегодно обмерзает на длину годовичного прироста, но, благодаря хорошему побеговозобновлению, отрастает и образует куст округлой формы. Родина вида – Япония [9].

S. chamaedrifolia L. (С. дубровколистная) – невысокий кустарник, зацветающий в условиях Центральной Якутии на второй год. Представляет собой прямостоячий кустарник с тонкими побегами, образующими густую крону. Листья овальные, зубчатые, заостренные к вершине. Белые цветки собраны в щитки на верхней части побега. Более старые ветви изгибаются к земле, что придает кроне округлую форму. Молодые (2–3-летние) растения зацветают в середине августа и цветут до заморозков. Более взрослые начинают цвести в середине июня. Ареал обитания: от Восточной Европы до Дальнего Востока. Произрастает на каменистых склонах, в горных лесах. В условиях культуры ЯБС обильно плодоносит на плодородной почве. Мезоксерофит. Светолюбива. Зимостойкость II балла.

S. alpine Pall. (С. альпийская) – невысокий кустарник, ежегодно подмерзающий на половину своей высоты. 3-летние растения достигают высоты не более 15 см. При этом образуется большое количество побегов кушения (8). Молодые побеги очень тонкие, ребристые красно-бурые. Листья очередные, собраны вместе по несколько штук, очень узкие, линейно-ланцетные, до 2,5 см длиной и до 8 мм шириной. Сверху темно-зеленые, снизу сизые, без опушения. Цветение наблюдается на 2-летних побегах. Мелкие цветки собраны в щитковидные соцветия бледно-кремового цвета. 2–3-летние растения зацветают в середине августа и цветут до заморозков. Ареал: Монголия, Китай, Сибирь. Мезофит, петрофит. Зимостойкость низкая (IV–V баллов).

S. japonica L (С. японская) – невысокий кустарник с войлочно-опушенными побегами, продолговато-яйцевидными зазубренными листьями, сверху зеленые, снизу они сизоватые, при распускании с красным оттенком, осенью — эффектной разнообразной окраски. Начинает цвести в конце июня и цветет до заморозков. 2-летние растения зацветают в начале августа (рис. 5). Цветки ярко-розовые, собраны в небольшие 5–6 см в диаметре, щитковидно-метельчатые соцветия. Распространена в Японии, Китае. Мезоксерофит, мезотроф, светолюбива. Зимостойкость средняя (III балла), однако хорошо восстанавливается.

S. japonica «Golden Princess» (С. японская сорт «Золотая принцесса») интродуцируется в ЯБС с 2013 г. Отличается небольшой округлой формой



Рис.5. Цветение *S. japonica*



Рис. 6. Цветение *S. japonica* «Golden Princess»

кроны и желтыми овально-заостренными листьями разных оттенков в течение сезона. Высота кустиков составляет не более 12 см. Цветки розовато-красные собраны в щитковидные соцветия диаметром 3–4 см, которые располагаются в верхней части побегов (рис.6).

Спиреи подразделяют на 2 группы: весенне-цветущие и летне-цветущие, что обусловлено характером закладывания генеративных почек. У весенне-цветущих почки закладываются на побегах предыдущего года, у летне-цветущих – на побегах текущего года. Как правило, весенне-цветущие спиреи имеют белую окраску цветов, летне-цветущие – розовую, ярко-кремовую, малиновую. Декоративность спиреи обусловлена не только цветом цветков, разнообразным расположением соцветий на побегах (на концах, в верхней части, по всей длине), но и сроками цветения.

В зависимости от сроков прохождения фенологических фаз виды спирей можно разделить на группы: ранний ритмотип (раннее начало вегетации, раннее цветение), средний (среднее начало вегетации, среднее цветение) и поздний (среднее начало вегетации, позднее цветение).

Таблица 1

Фенологические фазы видов спиреи местной и инорайонной флоры (2012–2013 гг.)

Вид	Начало вегетации	Начало цветения	Массовое цветение	Конец цветения	Осеннее раскрашивание листьев
<i>S. media</i>	15,05±5	28,05±3	12,06±2	19,06±5	10,08±3
<i>S. salicifolia</i>	25,05±6	19,06±3	27,06±3	07,07±5	13,08±4
<i>S. chamaedrifolia</i>	20,05±3	20,06±2	25,06±3	25,07±3	20,08±3
<i>S. japonica</i>	5,06±6	10,08±5	20,08±4	04,09±2	Весь сезон

Таблица 2

Изменчивость морфологических признаков *S. salicifolia* в зависимости от влагообеспеченности места произрастания

Признак	Влажное открытое место		Открытое место	
	$\frac{X-m_x}{\min-\max}$	CV	$\frac{X-m_x}{\min-\max}$	CV
Высота куста, м	$\frac{0,9\pm0,1}{0,5-1,2}$	25,7	$\frac{0,9\pm0,1}{0,8-1,5}$	22,3
Ширина листа, см	$\frac{1,5\pm0,1}{1,1-1,8}$	14,5	$\frac{0,42\pm0,2}{0,6-2,4}$	15,6
Длина листа, см	$\frac{5,3\pm0,1}{4-6,8}$	18,5	$\frac{3,13\pm0,3}{1,7-5}$	17,4
Длина 1 летнего прироста, см	$\frac{7,8\pm0,4}{6-38}$	46,1	$\frac{9,44\pm0,4}{4-40}$	41,2
Диаметр соцветия, см	$\frac{3,1\pm0,2}{1,8-4,5}$	23,6	$\frac{1,6\pm0,2}{1,5-2,7}$	17,5
Длина соцветия, см	$\frac{5\pm0,2}{3-8}$	27	$\frac{2,5\pm0,2}{1,5-3,2}$	16,5

Среди местных видов спиреи отмечены виды, относящиеся к раннему ритмотипу: *S. media*, *S. dahurica*, *S. sericea* и среднему: *S. betulifolia*, *S. salicifolia* (табл. 1). Изученные инорайонные виды относятся к среднему ритму (*S. chamaedrifolia*) и позднему (*S. alpine*, *S. japonica*).

На изменчивость морфологических признаков частей растений спиреи большое влияние оказывают влагообеспеченность и освещенность места произрастания (табл. 2). Среди изученных видов спиреи большинство относится к мезоксерофитам и только спирея иволистная – мезогигрофитам.

На открытых сухих местах произрастания на побегах *S. salicifolia* отмечали мелкие соцветия, длина которых составляла всего от 1,5 до 3,2 см, тогда как в влажных условиях – 3–8 см. При этом коэффициент вариации признака был средним (16,5) и высоким (27) соответственно. Средняя изменчивость отмечалась у признаков листа, хотя значения ширины и длины листовой пластинки были больше во влажных условиях. Очень высокий коэффициент вариации отмечен для длины однолетнего прироста (41,2–46,1). Эти данные указывают на необходимость тщательного выбора участков, соответствующих экологическим потребностям видов спиреи при использовании их в озеленении.

Заключение

Среди испытанных в ЯБС видов спиреи 10 видов представляют интерес для использования их в озеленении. Из них 5 видов относятся к флоре Якутии. Различная форма куста (плакучая, пирамидальная, прямостоячая, округлая), форма и окраска листьев, соцветий, разные сроки цветения придают исключительную декоративность кустам спиреи в течение всего вегетативного периода. А их нетребовательность к почвенным условиям, достаточно высокая зимо- и засухоустойчивость делают спирею незаменимым элементом декоративного оформления скверов, улиц городов и других населенных пунктов Якутии.

Литература

1. Тахтаджян А.Л. Система и филогения цветковых растений. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1966. – С. 266–267.
2. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. – СПб.: Мир и семья, 1995. – 990 с.
3. Встовская Т.Н., Корачинский И.Ю. Определитель местных и экзотических древесных растений Сибири. – Новосибирск, 2003. – С. 250–265.

4. Конспект флоры Сибири: Сосудистые растения. – Новосибирск: Наука, 2005. – 362 с.

5. Конспект флоры Якутии: Сосудистые растения / Сост. Л.В.Кузнецова, В.И.Захарова. – Новосибирск: Наука, 2012. – 272 с.

6. Ширманов М.В. Род *Spirea* L. (Rosaceae) на территории России // Исследования в области естественных наук. – 2012. – № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://science.snauka.ru/2012/05/311>.

7. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР / Под ред. П. И. Лапина. – М.: Совет ботаников СССР, 1975. – 23 с.

8. Мамаев С.А. О проблемах и методах внутривидовой систематики древесных растений. Амплитуда изменчивости // Труды Ин-та экологии растений и животных УФАИ СССР. – 1969. – Вып. 64.

9. Петрова А.Е., Романова А.Ю., Назарова Е.И. Интродукция деревьев и кустарников в Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. – 268 с.

10. Встовская Т.Н. Древесные растения – интродукты Сибири (*Spirea* - *Weigela*). – Новосибирск: Наука, 1987. – 273 с.

Поступила в редакцию 24.06.2015

Экологические особенности зимовки яиц саранчовых (Orthoptera, Acrididae) в Центральной Якутии

Ю.В. Ермакова

Институт биологических проблем криолитозоны, г. Якутск

Для пойкилотермных организмов особенно важным является наличие разнообразных адаптивных механизмов, позволяющих успешно противостоять неблагоприятным факторам окружающей среды. Рассмотрены экологические аспекты адаптации к зимнему периоду 6 видов саранчовых, обитающих в Центральной Якутии. Климат Центральной Якутии – один из наиболее суровых и резко континентальных в Восточной Сибири. Минимальные температуры почвы в Центральной Якутии в зимний период близки к температурам «полюса почвенного холода», расположенного в бассейнах рек Яны и Индигирки. Саранчовые зимуют в фазе яйца в почве под снежным покровом, на глубине 3–5 см, в переохлажденном состоянии. Экспериментальным путем показано, что значения температуры максимального переохлаждения 6 исследованных видов саранчовых лежат в пределах $-25 \dots -35^\circ\text{C}$. Порог длительно переносимых температур находится в интервале от -23 до -29°C , что гарантирует выживаемость яиц в зимний период. Наибольшим резервом холодоустойчивости из исследованных видов обладают *Omocestus haemorrhoidalis*, *Glyptobotrus maritimus jacutus* и *Gomphocerus sibiricus*, а наименьшим – *Bryodemella tuberculata*.

Ключевые слова: Центральная Якутия, саранчовые, холодоустойчивость, температура максимального переохлаждения.

Ecological Features of the Overwintering Eggs of the Grasshoppers (Orthoptera, Acrididae) in Central Yakutia

Y.V. Ermakova

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

To poikilothermic organisms it is particularly important the presence of a variety of adaptive mechanisms to successfully withstand to adverse environmental factors. The article deals with the environmental aspects of adaptation for the winter period of 6 species of grasshoppers living in Central Yakutia. The climate of Central Yakutia is one of the most severe and harsh continental in Eastern Siberia. The minimum soil temperatures in Central Yakutia in winter are close to the temperatures of the «Pole of Soil Cold», located in the basins of the Indigirka and Yana Rivers. Grasshopper eggs overwinter in the supercooled state in the soil under the snow, at depth of 3–5 cm. It is experimentally established that the eggs supercooling point (SCP) of 6 studied species of grasshoppers varies from -25 to -35°C . The threshold temperature is continuously transferred in the range from -23 to -29°C , and allows the eggs to safely survive severe winters. It is revealed that *Omocestus haemorrhoidalis*, *Glyptobotrus maritimus jacutus* and *Gomphocerus sibiricus* have higher reserve of cold hardiness, and *Bryodemella tuberculata* – the lower.

Key words: Central Yakutia, grasshoppers, cold hardiness, supercooling point.

Введение

Одним из важных условий существования насекомых в условиях холодного климата является успешное переживание продолжительного зимнего периода, для чего ими выработаны две

стратегии холодоустойчивости – зимовка в переохлажденном состоянии и зимовка в замерзшем состоянии, при котором происходит кристаллизация внеклеточных жидкостей [1–3]. Некоторые виды могут использовать обе стратегии, для них

характерны высокие температуры максимального переохлаждения и в то же время они способны переносить замерзание [4, 5].

Из трех семейств отряда прямокрылых, распространённых на территории Якутии, только представители семейства Tetrigidae зимуют в активных фазах развития – личинках разного возраста и неполовозрелых имаго. Зимовка происходит в замерзшем состоянии, об этом свидетельствуют высокие субнулевые значения температуры максимального переохлаждения (ТП) – 5,3...–7,4°C [6]. Кузнечиковые и саранчовые зимуют в стадии яйца в почве на глубине 3–5 см.

Климат Центральной Якутии – один из наиболее суровых и резко континентальных в Восточной Сибири: по значениям зимних температур он ненамного уступает климату Северо-Востока (Верхоянья и Оймякона), а наиболее высокие летние температуры (абсолютные и среднемесячные) отмечаются только здесь.

Существенное влияние на формирование термического режима грунтов в зимнее время оказывает снежный покров. Наибольшей высоты (30–40 см) он достигает в конце февраля и остается на этом уровне до 3-й декады марта. Максимальная высота снежного покрова в отдельные годы в защищенных местах может достигать 45–65 см. На открытых местах снег ниже на 5–10 см [7].

Согласно схеме распределения годовых минимумов температур почвы на глубине 3 см, минимальные температуры почвы в районе исследований близки к температурам «полюса почвенного холода», расположенного в бассейнах рек Яны и Индигирка [8].

Материал и методика

Изучение адаптации прямокрылых к зимовке в условиях холодного климата проводилось на стационаре «Тюнгюлю» Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, расположенном на Тюнгюлюнской террасе Лено-Амгинского междуречья в 50 км СВ от г. Якутска. Прямокрылые отлавливались на влажных (пл. №5), настоящих (пл. №4) и остепненных (пл. №3) лугах термокарстовых аласных котловин, пашне (пл. №2), в лиственничном лесу (пл. №1) и на опушке (пл. №6) и помещались в садки в соотношении самки / самцы – 1:1. На дно садков насыпался субстрат, пригодный для откладки кубышек. В конце сезона субстрат просеивался, кубышки собирали в полотняные мешочки, снабжали этикеткой и помещали на зимовку в естественные условия. Кубышки были получены от 6 видов саранчовых: *Prumna primnoa* (Fischer-Waldheim, 1846), *Omocestus haemorrhoidalis* (Charpentier, 1825), *Glyptobothrus mariti-*

Таблица 1

Распределение саранчовых на мониторинговых площадках стационара «Тюнгюлю»

Вид	№ площадки					
	1	2	3	4	5	6
<i>Prumna primnoa</i>	+	–	–	–	–	+
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	–	+	+	–	–	–
<i>Glyptobothrus maritimus jacutus</i>	+	+	+	–	–	+
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	–	+	+	–	–	+
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	–	–	+	+++	+	–
<i>Bryodemella tuberculata</i>	–	+	+	–	–	–

mus jacutus (Storozhenko, 2002), *Gomphocerus sibiricus* (Linnaeus, 1758), *Chorthippus albomarginatus* (De Geer, 1773), *Bryodemella tuberculata* (Fabricius, 1775) (табл. 1).

Температуры максимального переохлаждения яиц саранчовых определены в лаборатории теплотехники ИФТПС СО РАН (г. Якутск). Извлеченные из кубышек яйца при помощи глицерина фиксировались на спая манганин-константановой термопары и помещались в специальную камеру, изолированную пенопластом. Яйца охлаждались до температур –40...–45°C в климатической камере Fontron со скоростью до 1°C/мин [9, 10]. Температуры регистрировались автоматически, точность измерения составляла около 0,02°C. При достижении точки максимального переохлаждения в исследуемых объектах началась спонтанная кристаллизация жидкости, при этом фиксировался резкий скачок температуры вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации.

Результаты и их обсуждение

Анализ динамики температуры почв в зимний период на мониторинговых площадках стационара «Тюнгюлю» показал, что период с температурами ниже –10°C продолжается около пяти месяцев [11]. Минимальные температуры в верхних слоях почв исследованных биотопов наблюдаются с конца III декады ноября до середины II декады февраля. Наиболее низкие температуры в

Таблица 2

Минимальные температуры в верхних слоях почвы мониторинговых площадок [11]

№ площадки	1	2	3	4	5	6
Дата	27.XI	29.XII	28.I	29.XII	29.XII	28.I
0 см	–30°C	–32°C	–30°C	–22°C	–32°C	–20°C
Дата	29.XII	27.XI–29.XII	15.II	29.XII	28.I	28.I
5 см	–21°C	–22°C	–21°C	–17°C	–22°C	–18°C
Тпочв.ср	–25,5°C	–27°C	–25,5°C	–19,5°C	–27°C	–19°C

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗИМОВКИ ЯИЦ САРАНЧОВЫХ

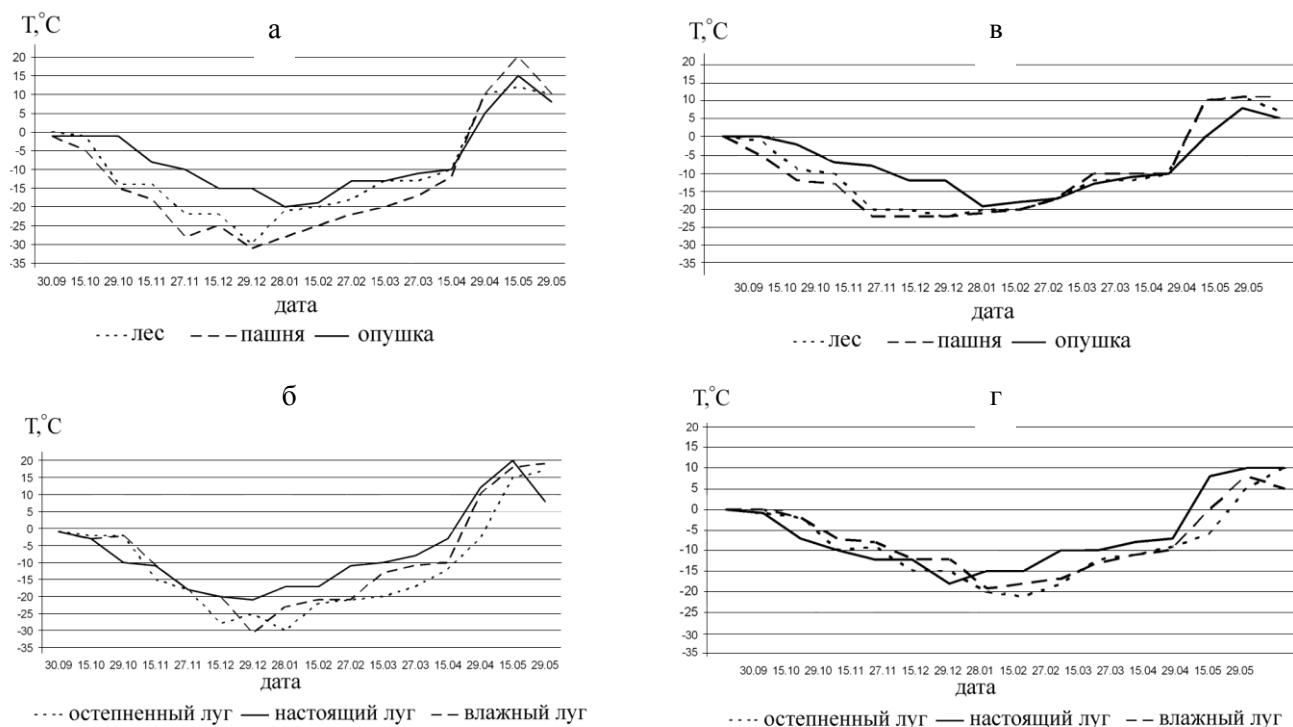


Рис. 1. Динамика температуры почвы под снежным покровом на глубине: а, б – 0 см ; в, г – 5 см

верхнем слое и на глубине 5 см отмечены на пашне и во влажном поясе, наиболее высокие минимальные – на настоящем поясе аласного луга и опушке лиственничника (табл. 2). Средняя минимальная температура почвы под снежным покровом в слое 0–5 см для всех исследованных биотопов в наиболее холодный период равна –23,9°C. Температура почвы на глубине 2–3 см, в местах зимовки кубышек саранчовых, практически не опускается ниже –25 ...–30°C (рис.1), об этом свидетельствуют расчеты, произведенные А.В. Алфимовым для территории Северной Евразии [8].

Яйца насекомых не переносят замерзания, поэтому основной характеристикой их холодоустойчивости служит температура максимального переохлаждения [12], которая у разных видов может варьировать в довольно широком диапазоне (до 10°C). В пределах вида разброс температур, за немногим исключением, менее выражен и не превышает 4–5°C (табл. 3).

Температура максимального переохлаждения большинства исследованных яиц близка к средним значениям для каждого вида. Так, для *Prumna primnoa* более 80 % выборки имеют значения ТП в пределах –29...–30°C; *Omocestus haemorrhoidalis* – более 60 % в пределах –33...–34°C; *Glyptobotrus maritimus jacutus* – около 70% в пределах –31...–32°C; *Gomphocerus sibiricus*

Т а б л и ц а 3

Температуры максимального переохлаждения яиц саранчовых (Центральная Якутия)

Вид	№ кубышек	п яиц в кубышке	ТП _{ср.} , °C	ТП _{min} , °C	ТП _{max} , °C
<i>Prumna primnoa</i>	5	12–20	–29,3±0,22	–26,4	–30,6
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	5	4–11	–33,1±0,34	–30,7	–35,0
<i>Glyptobotrus maritimus jacutus</i>	5	6–18	–31,9±0,23	–30,1	–34,4
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	5	5–10	–32,4±0,35	–29,6	–34,6
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	5	7–10	–29,7±0,56	–25,3	–31,7
<i>Bryodemella tuberculata</i>	5	8–20	–27,8±0,46	–24,5	–30,2

более половины исследованных яиц имеют ТП в пределах –31...–32°C, для *Bryodemella tuberculata* – более 63% выборки в пределах –27...–28°C. Исключение составляет *Chorthippus albomarginatus*, у которого более 61% измерений ТП лежат в пределах –30...–31°C, что немного ниже среднего значения ТП вида (рис. 2).

Исследования холодоустойчивости 10 видов прямокрылых, проведенные сотрудниками лаборатории биоценологии ИБПС СВНЦ ДВО РАН в

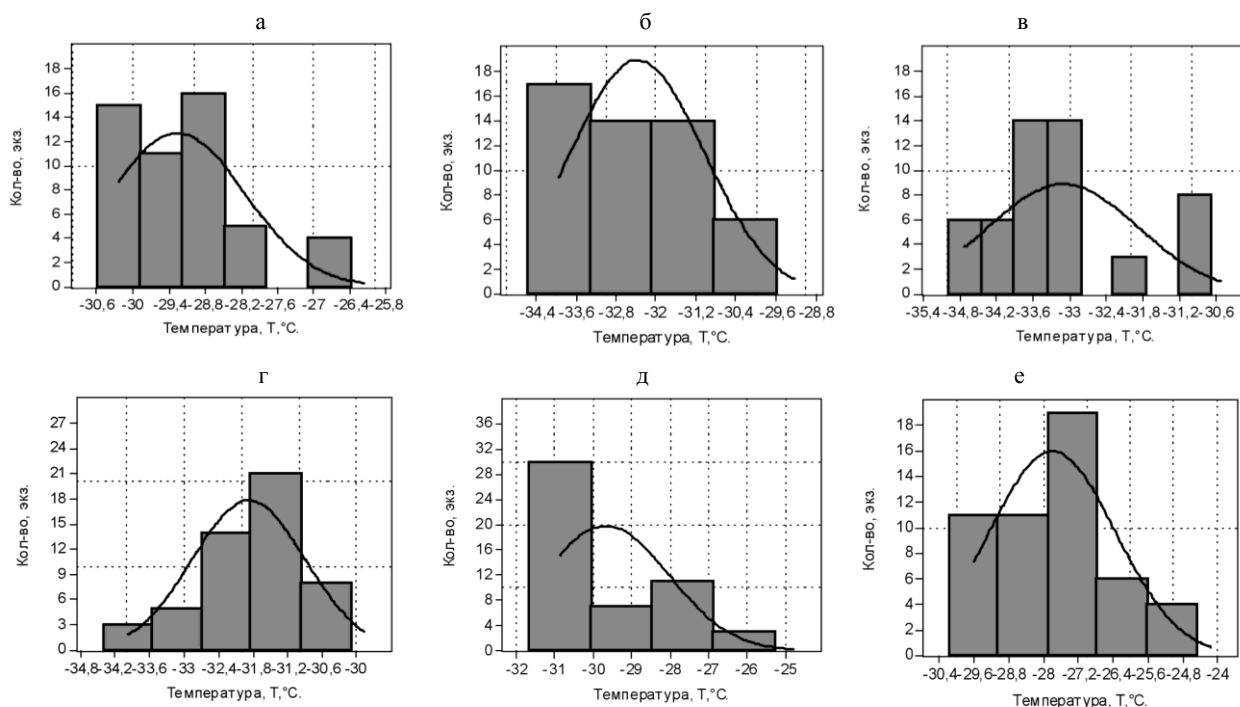


Рис. 2. Распределение температур максимального переохлаждения: а – *Prumna primnoa*; б – *Gomphocerus sibiricus*; в – *Omocestus haemorrhoidalis*; г – *Glyptobotrus maritimus jacutus*; д – *Chorthippus albomarginatus*; е – *Bryodemella tuberculata*

бассейне верховой Колымы (стационар «Абориген»), показали, что ТП яиц у большинства исследованных видов также находятся в диапазоне $-25 \dots -35,5^\circ\text{C}$ [12]. Так, значения ТП яиц *Gomphocerus sibiricus* варьируют от $-26,5$ до -32°C , а *Glyptobotrus maritimus jacutus* – от $-24,9$ до $-32,1^\circ\text{C}$, что несколько выше ТП яиц центральной якутской популяции (табл. 3). Средние значения ТП яиц *Bryodemella tuberculata* из Магаданской области оказались почти на 3 градуса ниже, чем в Центральной Якутии, $-31,2^\circ\text{C}$, но 50% выборки находилась в тех же пределах, что и у центральной якутской популяции. В целом значения ТП центральной якутских и колымских популяций лежат в пределах значений, характерных для каждого вида.

Кроме способности кратковременно переносить низкие температуры, важную роль играет устойчивость насекомых к их длительному воздействию. Для яиц *Chorthippus fallax* ($\text{ТП}_{\text{ср}} = -31,18 \pm 0,8^\circ\text{C}$) из Внутренней Монголии установлено, что при температуре, равной $\text{ТП}_{\text{ср}}$, 50% исследованных яиц погибает в течение 12 ч. При температуре, равной -25°C (т.е. на 6°C выше), подобный результат достигался только через 44 дня [13].

Исходя из средних значений ТП, можно предположить, что порог длительно переносимых температур для исследованных видов саранчовых лежит в интервале от -23 до -29°C . Если принять значение порога устойчивости к длительному воздействию низких температур на 4°C выше средней ТП вида, то наибольшим «резервом холодоустойчивости», определяемым как разница между порогами переносимых температур и минимальными температурами в местах зимовки [9], обладают *Omocestus haemorrhoidalis*, *Glyptobotrus maritimus jacutus* и *Gomphocerus sibiricus*, а наименьшим – *Bryodemella tuberculata* (табл. 4).

Но даже в наиболее суровые и малоснежные зимы, когда значительная часть популяции может не перезимовать, выживают яйца, имеющие наиболее низкие ТП и соответственно обладающие значительным «резервом холодоустойчивости».

Таблица 4

Основные параметры холодоустойчивости яиц саранчовых в Центральной Якутии

Вид	$T_{\text{почв. ср.}}, ^\circ\text{C}$ 0–5 см	$\text{ТП}_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	Ср. порог устойчивости, $^\circ\text{C}$	Резерв холодоуст., $^\circ\text{C}$
<i>Prumna primnoa</i>	$-23,9 \pm 1,58$	$-29,3 \pm 0,22$	$-25,3$	1,4
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>		$-33,1 \pm 0,34$	$-29,1$	5,2
<i>Glyptobotrus maritimus jacutus</i>		$-31,9 \pm 0,23$	$-27,9$	4,0
<i>Gomphocerus sibiricus</i>		$-32,4 \pm 0,35$	$-28,4$	4,5
<i>Chorthippus albomarginatus</i>		$-29,7 \pm 0,56$	$-25,7$	1,8
<i>Bryodemella tuberculata</i>		$-27,8 \pm 0,46$	$-23,8$	0

сти». Поэтому «физиологическая разнокачественность» особей в природных популяциях служит важным приспособлением, способствующим сохранению вида в изменчивых условиях среды [14].

Таким образом, при адаптации к суровым условиям зимнего периода в районе Области холода Северного полушария для саранчовых характерна зимовка в переохлажденном состоянии, в фазе диапаузирующих яиц. Глубина переохлаждения яиц у исследованных видов варьирует в пределах $-25...-35^{\circ}\text{C}$, что вполне обеспечивает выживаемость в зимний сезон в условиях Центральной Якутии.

Автор признателен д.б.н. Десяткину Р.В. (ИБПК СО РАН) за помощь в организации полевых исследований и данные по динамике температуры почвы в зимний период, за ценные советы и методическую помощь – д.б.н. Берману Д.И. и к.б.н. Алфимову А.В. (ИБПС ДВО РАН, г. Магадан), за помощь в проведении экспериментальных исследований – д.т.н. Тимофееву А.М. (ИФТПС СО РАН, г. Якутск)

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0376-2014-0001. Тема 51.1.4 «Животное население приарктической и континентальной Якутии: видовое разнообразие, популяции и сообщества (на примере низовьев и дельты рек Лены, тундр Яно-Индигиро-Колымского междуречья, бассейна Средней Лены и Алдана».

Литература

1. Ушатинская Р.С. Скрытая жизнь и анабиоз. – М.: Наука, 1990. – 182 с.
2. Blok W. Insects and freezing. // Science Progress. – 1995. – Vol. 78, No. 4. – P. 349–372.
3. Somme L. Supercooling and winter survival in terrestrial arthropoda // Comparative Biochemistry and Physiology. – 1982. – Vol. A 73, No 4. – P. 519–543.
4. Ring R.A. Freezing-tolerant insects with low supercooling points // Comparative Biochemistry and Physiology. – 1982. – Vol. A 73, No 4. – P. 605–612.
5. Аверенский А.И., Ли Н.Г. Стратегия холодовой адаптации у насекомых, обитающих в Центральной Якутии // Биофизика. – 2007. – Т. 52, вып.4. – С. 747–752.
6. Берман Д.И., Лейрих А.Н. Факторы, влияющие на динамику численности саранчовых (Orthoptera, Insecta) Северо-Востока Азии // Популяционная экология животных: Материалы Международной конференции «Проблемы популяционной экологии животных», посвященной памяти акад. И.А. Шиловой. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 275–277.
7. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1973. – 118 с.
8. Алфимов А.В. Распределение минимальных температур в поверхностном слое почвы под снежным покровом в Евразии // Почвоведение. – 2005. – № 4. – С. 438–455.
9. Горышин Н.И. Техническое оснащение экологических исследований в энтомологии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. – 236 с.
10. Берман Д.И., Алфимов А.В., Жигульская З.А., Лейрих А.Н. Зимовка и холодоустойчивость муравьев на Северо-Востоке Азии. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. – 261 с.
11. Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2008. – 324 с.
12. Берман Д.И., Лейрих А.Н., Якимчук Н.В. Зимовка и связанные с ней особенности биологии темного тетрика (*Tetrix fuliginosa*, Orthoptera, Tetrigidae) на Северо-Востоке СССР // Зоологический журнал – 1989. – Т. 68, вып. 9. – С. 86–96.
13. Hao Shu Guang, Kang Le. Supercooling capacity and cold hardiness of the eggs of the grasshopper *Chorthippus fallax* (Orthoptera, Acrididae) // European Journal of Entomology. – 2004. – e. 25; 101(2). – P. 231–236.
14. Ушатинская Р.С. Вопросы экологической физиологии насекомых. – М.: Наука, 1987. – 175 с.

Поступила в редакцию 24.06.2015

УДК 595.793.1 (571.56)

Обзор пилильщиков семейства Pamphiliidae (Hymenoptera, Symphyta) Якутии

А.А. Попов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приводится 25 видов пилильщиков семейства Pamphiliidae, из которых 2 вида (*Cephalcia pallidula* Guss., *Pamphilus hortorum* Kl.) впервые указываются для фауны Якутии. Дана краткая характеристика

сти». Поэтому «физиологическая разнокачественность» особей в природных популяциях служит важным приспособлением, способствующим сохранению вида в изменчивых условиях среды [14].

Таким образом, при адаптации к суровым условиям зимнего периода в районе Области холода Северного полушария для саранчовых характерна зимовка в переохлажденном состоянии, в фазе диапаузирующих яиц. Глубина переохлаждения яиц у исследованных видов варьирует в пределах $-25...-35^{\circ}\text{C}$, что вполне обеспечивает выживаемость в зимний сезон в условиях Центральной Якутии.

Автор признателен д.б.н. Десяткину Р.В. (ИБПК СО РАН) за помощь в организации полевых исследований и данные по динамике температуры почвы в зимний период, за ценные советы и методическую помощь – д.б.н. Берману Д.И. и к.б.н. Алфимову А.В. (ИБПС ДВО РАН, г. Магадан), за помощь в проведении экспериментальных исследований – д.т.н. Тимофееву А.М. (ИФТПС СО РАН, г. Якутск)

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0376-2014-0001. Тема 51.1.4 «Животное население приарктической и континентальной Якутии: видовое разнообразие, популяции и сообщества (на примере низовьев и дельты рек Лены, тундр Яно-Индигиро-Колымского междуречья, бассейна Средней Лены и Алдана».

Литература

1. Ушатинская Р.С. Скрытая жизнь и анабиоз. – М.: Наука, 1990. – 182 с.
2. Blok W. Insects and freezing. // Science Progress. – 1995. – Vol. 78, No. 4. – P. 349–372.
3. Somme L. Supercooling and winter survival in terrestrial arthropoda // Comparative Biochemistry and Physiology. – 1982. – Vol. A 73, No 4. – P. 519–543.
4. Ring R.A. Freezing-tolerant insects with low supercooling points // Comparative Biochemistry and Physiology. – 1982. – Vol. A 73, No 4. – P. 605–612.
5. Аверенский А.И., Ли Н.Г. Стратегия холодовой адаптации у насекомых, обитающих в Центральной Якутии // Биофизика. – 2007. – Т. 52, вып.4. – С. 747–752.
6. Берман Д.И., Лейрих А.Н. Факторы, влияющие на динамику численности саранчовых (Orthoptera, Insecta) Северо-Востока Азии // Популяционная экология животных: Материалы Международной конференции «Проблемы популяционной экологии животных», посвященной памяти акад. И.А. Шиловой. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 275–277.
7. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1973. – 118 с.
8. Алфимов А.В. Распределение минимальных температур в поверхностном слое почвы под снежным покровом в Евразии // Почвоведение. – 2005. – № 4. – С. 438–455.
9. Горышин Н.И. Техническое оснащение экологических исследований в энтомологии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. – 236 с.
10. Берман Д.И., Алфимов А.В., Жигульская З.А., Лейрих А.Н. Зимовка и холодоустойчивость муравьев на Северо-Востоке Азии. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. – 261 с.
11. Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2008. – 324 с.
12. Берман Д.И., Лейрих А.Н., Якимчук Н.В. Зимовка и связанные с ней особенности биологии темного тетрика (*Tetrix fuliginosa*, Orthoptera, Tetrigidae) на Северо-Востоке СССР // Зоологический журнал – 1989. – Т. 68, вып. 9. – С. 86–96.
13. Hao Shu Guang, Kang Le. Supercooling capacity and cold hardiness of the eggs of the grasshopper *Chorthippus fallax* (Orthoptera, Acrididae) // European Journal of Entomology. – 2004. – e. 25; 101(2). – P. 231–236.
14. Ушатинская Р.С. Вопросы экологической физиологии насекомых. – М.: Наука, 1987. – 175 с.

Поступила в редакцию 24.06.2015

УДК 595.793.1 (571.56)

Обзор пилильщиков семейства Pamphiliidae (Hymenoptera, Symphyta) Якутии

А.А. Попов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приводится 25 видов пилильщиков семейства Pamphiliidae, из которых 2 вида (*Cephalcia pallidula* Guss., *Pamphilus hortorum* Kl.) впервые указываются для фауны Якутии. Дана краткая характеристика

тика зоогеографических и экологических особенностей каждого вида, литературные данные и изученный материал. Ареалогический анализ показал, что большая часть фауны (11 видов) имеет широкое трансевразийское распространение. По широте пищевых связей большинство видов относится к узким олигофагам – 16 видов, к широким олигофагам – 6. По срокам лета имаго все виды семейства Pamphiliidae можно отнести к летней группе. Большого хозяйственного значения на исследованной территории памфилиды не имеют, т.к. вспышек массового размножения в суровых климатических условиях Якутии не дают.

Ключевые слова: Hymenoptera, Symphyta, Pamphiliidae, пилильщики, фауна, Якутия.

Sawflies of the Family Pamphiliidae (Hymenoptera, Symphyta) of Yakutia

A.A. Popov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

In the paper 25 species of Pamphiliidae sawflies are presented, 2 of which (Cephalcia pallidula Guss., Pamphilius hortorum Kl.) are firstly recorded for the fauna of Yakutia. Brief characteristics of zoogeographical and ecological features, literature data, studied material are given for each species. Arealogical analysis showed that large part of fauna (11 species) has wide trans-euroasiatic distribution. By trophic relations it was showed that 16 species are narrow oligophages and 6 species are wide oligophages. By imago's flight activities all of the species of Pamphiliidae family belong to a summer group. Economic importance of Pamphiliidae sawflies is insignificantly because Pamphiliidae sawflies have no outbreaks of mass reproduction in severe climate of Yakutia.

Key words: Hymenoptera, Symphyta, Pamphiliidae, sawflies, fauna, Yakutia.

В статье представлены результаты многолетнего изучения фауны пилильщиков семейства Pamphiliidae Якутии. В мировой фауне насчитывается 295 видов из 2 подсемейств, 5 триб и 10 родов, на Дальнем Востоке представлено 54 вида из 6 родов [1, 2]. Отрывочные литературные сведения о памфилидах Якутии можно найти в работах российских [1–9] и зарубежных энтомологов [10–12], в которых для Якутии указываются 16 видов. Региональные исследования памфилид были начаты в работах якутских ученых Ю.Н. Аммосова и Е.Л. Каймук (приводится 14 видов) и продолжены в наших предварительных обзорах этого семейства [13–24].

Кроме собственных сборов использованы материалы из коллекционных фондов Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск), всего было исследовано свыше 90 экз. экземпляров имаго. В списке видов материал приводится по четырем районам Якутии [25]: **СВ** – Северо-Восточный, горно-таежный; **З** – Западный, таежный; **Ц** – Центральный, таежный со степными участками; **ЮЗ** – Юго-Западный, таежный со степными участками. В состав исследованных регионов Якутии вошли следующие пункты сбора материала: **Северо-Восточный**. Хребет Черского, хребет Улахан Чистай, р. Гырбыня; р. Восточная Хандыга; р. Туостях, правый приток р. Адыча; хребет Сунтар-Хаята, р. Атомоле, левый приток р. Восточная Хандыга, 227 км Магаданского тракта; хребет Сунтар-Хаята, р.

Сунтар. **Западный**. г. Нюрба; окрестности с. Кемпендэй, 3 км от озера Сордоннох. **Центральный**. стационар ИБПК Спасская падь, 30 км СВ Якутска; г. Якутск; долина р. Куллаты, 35 км ЮЮЗ г. Якутска; г. Покровск; Природный парк «Ленские столбы»; устье р. Лабыя; устье р. Улахан Тарын, 30 км выше устья р. Синяя; с. Еланское, 60 км ЮЗ г. Покровска; с. Едей, 200 км выше г. Якутска; с. Хаптагай, 30 км Ю г. Якутска; с. Тюнгилю, 40 км Ю г. Якутска. **Юго-Западный**. верховья р. Пилка; среднее течение р. Пилка, урочище «Золотопродснаб»; р. Нюя, 30 км СВ Ленска; урочище Хомустах на р. Нюя близ Захаровки, урочище Ирелях на р. Нюя; г. Олекминск; с. Заречное; устье р. Олекмы (с. Троицкое, о. Терюль). **Южный**. Алданское нагорье, верховья р. Алгама, правый приток р. Гонам, ручей Артык. При характеристике географического распространения видов использовалась классификация, предложенная К.Б. Городковым [26]. Сведения о кормовых растениях даны по Б.Н. Вержуцкому [5, 27], А.Н. Желоховцеву и А.Г. Зиновьеву [7], Ю.Н. Сундукову и А.С. Лелею [2], А. Тэгеру и др. [28].

Обзор видов

Семейство PAMPHILIIDAE

Подсемейство Cephalciinae

1. *Acantholyda laricis* (Giraud, 1861). Европейско-сибирский эвбореальный бореомонтанный вид. Вредит лиственнице (*Larix*). Литература: [1–

3, 8, 11–13, 19, 22]. Материал: **СВ**: 1♂, хребет Сунтар-Хаята, р. Атомоле, 26.VI.1991 (Винокуров). **З**: 1♀, Нюрба, 8.VII.1987 (Каймук). **Ц**: 2♀, Еланское, 9.VII.1979 (Каймук).

2. *Acantholyda posticalis pinivora* Enslin, 1918. Европейско-сибирский эвбореальный бореомонтанный. Литература: [1, 3, 12, 13, 21]. Материал: **СВ**: 1♀, хребет Сунтар-Хаята, р. Атомоле, 26.VI.1991 (Винокуров). **З**: 7♀1♂, Нюрба, 18.VI.1986–19.VII.1987 (Каймук). **Ц**: 1♀, р. Кулаты, 18.VI.2008 (Винокуров).

3. *Cephalcia lariciphila* (Wachtl, 1898). Трансевразийский эвбореальный бореомонтанный вид. На лиственнице (*Larix*). Литература: [1, 2, 12, 13, 19, 21, 22, 24]. Материал: **СВ**: 1♀, р. Туостях, правый приток р. Адыча, 27.VI.1989; 1♀, хребет Сунтар-Хаята, верховья р. Восточная Хандыга, 23.VI.1991 (Каймук); 2♀, правый приток р. Сунтар, 9.VII.2003 (Степанов). **З**: 5♀1♂, Нюрба, 18.VI.1986–1.VII.1987 (Каймук). **Ц**: 1♀, стационар «Спаская падь», 30 км СВ Якутска, 19.VI.2004 (Попов); 4♀, Еланское, 23.VI–2.VII.1979 (Каймук); 1♀, Хаптагай, 6.VI.1975 (Каймук); 3♀2♂, Тюнгюлю, 14.VI.1990–16.VI.1992 (Каймук).

4. *Cephalcia abietis* (Linné, 1758). Трансевразийский эвбореальный бореомонтанный вид. Личинки на ели (*Picea*). Литература: [1, 3, 6, 8, 11–13, 19, 21, 24]. Материал: **Ц**: 1♀, Природный парк «Ленские столбы», устье р. Лабыйа, 12.VII.2001 (Потапова). **ЮЗ**: 1♀, р. Нюя, 6.VI.1968; 1♀, Олекминск, 17.VIII.1981.

5. *Cephalcia arvensis* Panzer, 1803. Транспалеарктический бореальный вид. Личинки на ели (*Picea*). Литература: [1, 6, 12, 13, 19]. Материал: **СВ**: 1♂, р. Туостях, правый приток р. Адыча, 27.VI.1989. **Ц**: 1♀, Природный парк «Ленские столбы», устье р. Улахан Тарын, 30.VI.2001 (Потапова). **ЮЗ**: 1♀, Троицкое, 9.VI.1971.

6. *Cephalcia koebelei* (Rohwer, 1910). Сибиродальневосточный бореальный вид. На лиственнице (*Larix*). Литература: [21]. Материал: **Ц**: 1♀, Природный парк «Ленские столбы», устье р. Улахан Тарын, 1.VII.2001 (Потапова). Всего 1 экз.

7. **Cephalcia pallidula* (Gussakovskij, 1935). Трансевразийский бореальный вид. Питается на ели (*Picea*). Материал: **З**: 1♀, окрестности с. Кемпендэй, 3 км от озера Сордоннох, 24.06.2011 (Сивцева). **Ю**: 1♀, Алданское нагорье, верховья р. Алгама, правый приток р. Гонам, ручей Артык, 14.VII.2000 (Ноговицына).

Подсемейство Pamphiliinae

8. *Neurotoma iridescens* (André, 1882). Трансевразийский бореально-субтропический. Личинки на сливе (*Prunus*), рябине (*Sorbus*), рябиннике (*Sorbaria*). Литература: [12, 15, 17]. Материал: **ЮЗ**: 1♀, Троицкое, VI.1971.

9. *Neurotoma sibirica* Gussakovskij, 1935. Сибиродальневосточный бореальный вид. На рябиннике (*Sorbaria*). Литература: [11]. Материал: **Ц**: 2♀, Покровск, 10.VII.1980 (Каймук); 1♀, Еланское, 1.VII.1979 (Каймук); 1♀, Едей, 10.VII.1980 (Каймук). **ЮЗ**: 1♀, Олекминск, 14.VI.1971 (Каймук); 1♂, Троицкое, 9.VII.1970 (Каймук).

10. *Pamphilius albopictus* (Thomson, 1871). Трансевразийский бореальный вид. На сливе (*Prunus*). Литература: [21, 24]. Приводится по литературным данным.

11. *Pamphilius alnivorius* Shinohara, 2005. Восточно-палеарктический бореальный. На ольхе (*Alnus*). Литература: [21, 24]. Приводится по литературным данным.

12. *Pamphilius aucupariae* Vikberg, 1971. Европейско-сибирский бореальный вид. Литература: [27]. Приводится по литературным данным.

13. *Pamphilius betulae* (Linné, 1758). Европейско-сибирский бореальный. На осине (*Populus*). Литература: [16]. Приводится по литературным данным.

14. *Pamphilius balteatus* (Fallén, 1808). Трансевразийский арктотемператный. На розах (*Rosa*), землянике (*Fragaria*). Литература: [1, 12, 17, 21, 24]. Материал: **Ц**: 3♀2♂, стационар «Спаская падь», 30 км СВ Якутска, 26.VI.2003–18.VI.2004 (Попов). **ЮЗ**: 1♀, р. Нюя, Хомустах, 13.VI.1968; 4♀, Троицкое, о. Терють, 23.VI.1970–22.VI.1971.

15. *Pamphilius histrio* Latreille, 1812. Европейско-сибирский бореальный вид. На тополе (*Populus*). Литература: [15]. Материал: **ЮЗ**: 3♀, Троицкое, 12.VI.1970–10.VI.1971.

16. *Pamphilius heecheonparki* Shinohara, 1998. Восточно-палеарктический бореально-субтропический. Литература: [21, 24]. Приводится по литературным данным.

17. **Pamphilius hortorum* (Klug, 1808). Трансевразийский бореально-субтропический. Личинки питаются на малине (*Rubus*). Материал: **СВ**: 1♀, хребет Черского, р. Гырбыня, 24.VII.2003 (Ноговицына). **Ц**: 1♀, стационар «Спаская падь», 26.VI.2003 (Попов). Всего 2 экз.

18. *Pamphilius pallipes* (Zetterstedt, 1838). Трансевразийский бореальный вид. На березе (*Betula*). Литература: [3, 8, 11, 21, 24, 25]. Материал: **Ц**: 1♀, стационар «Спаская падь», 26.VI.2003 (Попов); 1♀, Природный парк «Ленские столбы», устье р. Улахан Тарын, 30.VI.2001 (Потапова). **ЮЗ**: 1♀, верховья р. Пилка, 29.VI.2000 (Винокуров); 2♀, среднее течение р. Пилка, урочище «Золотопродснаб», 3–4.VII.2000 (Винокуров); 2♀, р. Олекма, о. Терють, 23.VI.1970–19.VI.1971.

19. *Pamphilius pictifrons* Gussakovskij, 1935. Восточно-палеарктический бореальный. Литература: [10, 21, 24, 26]. Материал: Ц: 1♀, Тюнгюлю, 14.VII.1990 (Каймук).

20. *Pamphilius inanitus* (Villers, 1789). Трансевразийский бореальный. Личинки развиваются на розах (*Rosa*). Литература: [15, 17]. Материал: ЮЗ: 1♀, Троицкое, 3.VII.1971.

21. *Pamphilius montanus pulcher* Shinohara, 1988. Восточно-палеарктический бореально-субтропический вид. Литература: [9, 21]. Приводится по литературным данным.

22. *Pamphilius sylvaticus* (Linné, 1758). Европейско-сибирский бореальный. На боярышнике (*Crataegus*), рябине (*Sorbus*). Литература: [1, 17]. Материал: ЮЗ: 1♀, р. Нюя, Ирелях, 7.VII.1968.

23. *Pamphilius vafer* (Linné, 1767). Трансевразийский бореальный. Личинки на ольхе (*Alnus*), березе (*Betula*). Литература: [12, 20, 22]. Материал: ЮЗ: 1♀, Заречное, 31.V.1971; 1♂, Троицкое, 23.VI.1971.

24. *Pamphilius varius* (Serville, 1823). Трансевразийский бореальный вид. На березе (*Betula*), ольхе (*Alnus*). Литература: [11, 12, 18, 23]. Материал: СВ: 1♀, хр. Черского, р. Гырбыня, 20.VII.2003 (Ноговицына). Ц: 1♀, Природный парк «Ленские столбы», устье р. Улахан Тарын, 30.VI.2001 (Потапова); 1♀, Тюнгюлю, 22.VI.1989 (Каймук). ЮЗ: 3♀1♂, Троицкое, 20.VI.1970-3.VIII.1971.

25. *Onycholyda lucida* (Rohwer, 1910). Восточно-палеарктический бореальный вид. Личинки питаются на березе (*Betula*). Литература: [11]. Материал: ЮЗ: 2♀, Троицкое, о. Терють, 21.VI-8.VII.1970. Всего 2 экз.

В результате наших исследований выявлено 25 видов из 5 родов, из них *Cephalcia pallidula* Guss. и *Pamphilius hortorum* Kl. для Якутии приводятся впервые, в тексте помечены звездочкой (*). Ареалогический анализ показал, что большая часть фауны имеет широкое трансевразийское распространение (11 видов) от Западной Европы до берегов Тихого океана. Видов с европейско-сибирскими ареалами – 6, восточнопалеарктических – 5, сибиро-дальневосточных – 2, транспалеарктических – 1. По широте пищевых связей большинство видов относится к узким олигофагам (16 видов), их личинки способны питаться на нескольких видах растений одного рода. Широкими олигофагами являются 6 видов, в кормовой спектр их личинок входят виды растений одного семейства. Пищевые связи 3 видов памфилид, к сожалению, не известны. По срокам лета имаго все виды семейства Pamphiliidae можно отнести к летней группе, т.к. их имаго в подавляющем большинстве встречаются с первой де-

кады июня до второй декады июля. Большого хозяйственного значения на исследованной территории памфилиды не имеют, т.к. вспышек массового размножения в суровых климатических условиях Якутии не дают. К потенциальным вредителям лиственницы и сосны можно отнести *Cephalcia lariciphila* Wachtl и *Acantholyda posticalis pinivora* Enslin, вспышки численности которых отмечались в других регионах Сибири и Европы.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0376-2014-0001. Тема 51.1.4 «Животное население приарктической и континентальной Якутии: видовое разнообразие, популяции и сообщества (на примере низовьев и дельты рек Лены, тундр Яно-Индиго-Колымского междуречья, бассейна Средней Лены и Алдана».

Литература

1. Синохара А., Лелей А.С. Надсем. Pamphilioidea. Сем. Pamphiliidae – Паутинные пилильщики, или пилильщики-ткачи // Определитель насекомых Дальнего Востока России. Т.IV. Сетчатокрылообразные, скорпионницы, перепончатокрылые. Ч.5. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 922–942.
2. Сундуков Ю.Н., Лелей А.С. Подотряд Symphyta – Сидячебрюхие // Аннотированный каталог насекомых Дальнего Востока России. Т.I. Перепончатокрылые. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – С. 62–120.
3. Гуссаковский В.В. Рогохвосты и пилильщики // Фауна СССР. Насекомые перепончатокрылые. – Т.II, вып. I. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1935. – 284 с.
4. Петренко Е.С. Насекомые – вредители лесов Якутии. – М.: Наука, 1965. – 167 с.
5. Вержуцкий Б.Н. Пилильщики Прибайкалья. – М.: Наука, 1966. – 162 с.
6. Вержуцкий Б.Н. Определитель личинок рогохвостов и пилильщиков Сибири и Дальнего Востока. – М.: Наука, 1973. – 139 с.
7. Желуховцев А.Н., Зиновьев А.Г. Список пилильщиков и рогохвостов (Hymenoptera, Symphyta) фауны России и сопредельных территорий. I // Энтомологическое обозрение. – 1995. – Т. 74, вып. 2. – С.395–415.
8. Зиновьев А.Г. Дополнения и исправления к списку пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) фауны России и сопредельных территорий // Энтомологическое обозрение. – 2000. – Т. 79, вып. 2. – С. 450–457.
9. Стrogанова В.К., Василенко С.В. К фауне пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) Якутии. Сообщение 1 // Членистоногие и гельминты. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 71–75.
10. Beneš K. The Siberia species of the genus Pamphilius related to Pamphilius vafer (L.) (Hymenoptera, Pamphiliidae) // Acta ent. Bohemoslovica. – 1976. – Vol. 73, №3. – P. 159–173.
11. Shinohara A. Pamphilius histrio (Hymenoptera, Pamphiliidae) and its close relatives // Bull. Nat. Sci.

Mus., Tokyo. – 1995. – Ser. A (Zoology) – Vol. 21, №1. – P. 37–70.

12. *Shinochara A., Vasilenko S.* Some Pamphiliid Sawflies (Hymenoptera) in the Collection of the Siberian Zoological Museum, Novosibirsk // Jpn. J. Syst. Entomol. – 2005. – Vol. 11, №1. – P. 31–37.

13. *Аверенский А.И., Багачанова А.К., Бурнашева А.П. и др.* Состав фауны членистоногих Ленского района // Почвы, растительный и животный мир Юго-Западной Якутии. – Новосибирск: Наука, 2006. – С. 103–155.

14. *Винокуров Н.Н., Потапова Н.К., Багачанова А.К. и др.* Новые виды насекомых, обнаруженных на территории природного парка «Ленские столбы» // Природный парк «Ленские столбы»: прошлое, настоящее и будущее. – Якутск, 2007. – С. 182–198.

15. *Каймук Е.Л., Попов А.А.* К фауне пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) – обитателей деревьев и кустарников Якутии // Лесные исследования в Якутии: итоги, состояние и перспективы. Т.1. Мерзлотное лесоведение и лесоводство. Лесная экология. – Якутск, 2006. – С. 160–163.

16. *Попов А.А.* К фауне пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) ягодных и декоративных кустарников и кустарничков Якутии // Достижения энтомологии на службе агропромышленного комплекса, лесного хозяйства и медицины: тезисы докладов XIII съезда Русского энтомологического общества. – Краснодар, 2007. – С. 171–172.

17. *Попов А.А.* Пилильщики пригородной зоны Якутска // Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества: материалы Международной научно-практической конференции. – Вып. 4. – Ставрополь: Агрус, 2008. – С. 127–129.

18. *Попов А.А., Каймук Е.Л.* Материалы по фауне пилильщиков (Hymenoptera, Tenthredinoidea) ресурсного резервата «Пилька» (Юго-Западная Якутия) // Человек и Север: Антропология, археология, экология: материалы Всероссийской конференции. – Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2009б. – Вып. 1. – С. 169–171.

19. *Попов А.А., Каймук Е.Л.* Пилильщики (Hymenoptera,

Symphyla) особо охраняемых природных территорий Якутии // Проблемы изучения и охраны животного мира на Севере: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Сыктывкар, 2009в. – С. 367–369.

20. *Степанов А.Д., Ноговицына С.Н., Попов А.А., Сивцева Л.В.* Список насекомых и пауков ООПТ Республики Саха (Якутия) // Разнообразие насекомых и пауков особо охраняемых природных территорий Якутии. – Якутск, 2007. – С. 90–159.

21. *Аммосов Ю.Н., Каймук Е.Л.* Особенности повреждения насекомыми хвои лиственницы даурской в среднетаежной зоне Якутии // Биологические проблемы Севера. VI симпозиум. – Вып. 2. – Якутск, 1974. – С. 143–147.

22. *Каймук Е.Л.* Материалы по фауне пилильщиков (Hymenoptera, Tenthredinoidea) Южной Якутии // Фауна и экология насекомых Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1972. – С. 71–90.

23. *Каймук Е.Л.* Заметки по ландшафтно-биотопическому распределению пилильщиков Южной Якутии // Фаунистические ресурсы Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974. – С. 120–124.

24. *Каймук Е.Л.* Хвоегрызущие пилильщики (Hymenoptera, Symphyta) Южной Якутии // Насекомые средней тайги Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975. – С. 24–31.

25. *Каймук Е.Л., Винокуров Н.Н., Бурнашева А.П.* Насекомые Якутии. Бабочки. – Якутск: Бичик, 2005. – 88 с.

26. *Городков К.Б.* Типы ареалов насекомых тундры и лесных зон европейской части СССР // Ареалы насекомых европейской части СССР. Атлас. Карты 179–221. – Л.: Наука, 1984. – 21 с.

27. *Вержущий Б.Н.* Растительноядные насекомые в экосистемах Восточной Сибири (пилильщики и рохвосты). – Новосибирск: Наука, 1981. – 303 с.

28. *Taeger A., Altenhofer E., Blank S.M. et al.* Kommentare zur Biologie, Verbreitung und Gefährdung der Pflanzenwespen Deutschlands (Hymenoptera, Symphyta) // Goecke & Evers. – 1998. – P. 49–135.

Поступила в редакцию 24.06.2015

УДК 595.733(571.56)

О сезонной активности стрекоз (Odonata) в Центральной Якутии

Л.В. Сивцева

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Изучена фенология имаго 25 видов стрекоз в криосемиаридных условиях Центральной Якутии, общая лётная активность которых длится 5 месяцев с мая по сентябрь. Выделено 6 сезонных групп: зимующая (1 вид) – летает с I декады мая по III декаду августа, поздневесенне-летняя (3) – с III декады мая по III декаду июля, поздневесенне-позднелетняя (1) – с III декады мая по III декаду августа, летняя

СИВЦЕВА Лена Валентиновна – м.н.с., sivtseva_l@mail.ru.

Mus., Tokyo. – 1995. – Ser. A (Zoology) – Vol. 21, №1. – P. 37–70.

12. *Shinochara A., Vasilenko S.* Some Pamphiliid Sawflies (Hymenoptera) in the Collection of the Siberian Zoological Museum, Novosibirsk // Jpn. J. Syst. Entomol. – 2005. – Vol. 11, №1. – P. 31–37.

13. *Аверенский А.И., Багачанова А.К., Бурнашева А.П. и др.* Состав фауны членистоногих Ленского района // Почвы, растительный и животный мир Юго-Западной Якутии. – Новосибирск: Наука, 2006. – С. 103–155.

14. *Винокуров Н.Н., Потапова Н.К., Багачанова А.К. и др.* Новые виды насекомых, обнаруженных на территории природного парка «Ленские столбы» // Природный парк «Ленские столбы»: прошлое, настоящее и будущее. – Якутск, 2007. – С. 182–198.

15. *Каймук Е.Л., Попов А.А.* К фауне пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) – обитателей деревьев и кустарников Якутии // Лесные исследования в Якутии: итоги, состояние и перспективы. Т.1. Мерзлотное лесоведение и лесоводство. Лесная экология. – Якутск, 2006. – С. 160–163.

16. *Попов А.А.* К фауне пилильщиков (Hymenoptera, Symphyta) ягодных и декоративных кустарников и кустарничков Якутии // Достижения энтомологии на службе агропромышленного комплекса, лесного хозяйства и медицины: тезисы докладов XIII съезда Русского энтомологического общества. – Краснодар, 2007. – С. 171–172.

17. *Попов А.А.* Пилильщики пригородной зоны Якутска // Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества: материалы Международной научно-практической конференции. – Вып. 4. – Ставрополь: Агрус, 2008. – С. 127–129.

18. *Попов А.А., Каймук Е.Л.* Материалы по фауне пилильщиков (Hymenoptera, Tenthredinoidea) ресурсного резервата «Пилька» (Юго-Западная Якутия) // Человек и Север: Антропология, археология, экология: материалы Всероссийской конференции. – Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2009б. – Вып. 1. – С. 169–171.

19. *Попов А.А., Каймук Е.Л.* Пилильщики (Hymenoptera,

Symphyla) особо охраняемых природных территорий Якутии // Проблемы изучения и охраны животного мира на Севере: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием. – Сыктывкар, 2009в. – С. 367–369.

20. *Степанов А.Д., Ноговицына С.Н., Попов А.А., Сивцева Л.В.* Список насекомых и пауков ООПТ Республики Саха (Якутия) // Разнообразие насекомых и пауков особо охраняемых природных территорий Якутии. – Якутск, 2007. – С. 90–159.

21. *Аммосов Ю.Н., Каймук Е.Л.* Особенности повреждения насекомыми хвои лиственницы даурской в среднетаежной зоне Якутии // Биологические проблемы Севера. VI симпозиум. – Вып. 2. – Якутск, 1974. – С. 143–147.

22. *Каймук Е.Л.* Материалы по фауне пилильщиков (Hymenoptera, Tenthredinoidea) Южной Якутии // Фауна и экология насекомых Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1972. – С. 71–90.

23. *Каймук Е.Л.* Заметки по ландшафтно-биотопическому распределению пилильщиков Южной Якутии // Фаунистические ресурсы Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974. – С. 120–124.

24. *Каймук Е.Л.* Хвоегрызущие пилильщики (Hymenoptera, Symphyta) Южной Якутии // Насекомые средней тайги Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975. – С. 24–31.

25. *Каймук Е.Л., Винокуров Н.Н., Бурнашева А.П.* Насекомые Якутии. Бабочки. – Якутск: Бичик, 2005. – 88 с.

26. *Городков К.Б.* Типы ареалов насекомых тундры и лесных зон европейской части СССР // Ареалы насекомых европейской части СССР. Атлас. Карты 179–221. – Л.: Наука, 1984. – 21 с.

27. *Вержущий Б.Н.* Растительноядные насекомые в экосистемах Восточной Сибири (пилильщики и роговосты). – Новосибирск: Наука, 1981. – 303 с.

28. *Taeger A., Altenhofer E., Blank S.M. et al.* Kommentare zur Biologie, Verbreitung und Gefährdung der Pflanzenwespen Deutschlands (Hymenoptera, Symphyta) // Goecke & Evers. – 1998. – P. 49–135.

Поступила в редакцию 24.06.2015

УДК 595.733(571.56)

О сезонной активности стрекоз (Odonata) в Центральной Якутии

Л.В. Сивцева

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Изучена фенология имаго 25 видов стрекоз в криосемиаридных условиях Центральной Якутии, общая лётная активность которых длится 5 месяцев с мая по сентябрь. Выделено 6 сезонных групп: зимующая (1 вид) – летает с I декады мая по III декаду августа, поздневесенне-летняя (3) – с III декады мая по III декаду июля, поздневесенне-позднелетняя (1) – с III декады мая по III декаду августа, летняя

СИВЦЕВА Лена Валентиновна – м.н.с., sivtseva_l@mail.ru.

(9) – с II декады июня по III декаду июля, летне-позднелетняя (9) – с II декады июня по I декаду сентября и летне-осенняя (2 вида) – с II декады июля по III декаду сентября. Вылет стрекоз из водоемов происходит в течение 7 декад от третьей декады мая до третьей декады июля, а наибольшее разнообразие их (25 видов) наблюдается во II и III декадах июля. Период сезонной лётной активности имаго стрекоз в исследованном районе существенно не отличается от периода лёта на северо-востоке европейской территории России. Сроки лёта стрекоз в Центральной Якутии длиннее на месяц, по сравнению с севером Дальнего Востока, и короче на месяц, чем на юге Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова: Якутия, Центральная Якутия, стрекозы, имаго, фенология, лётная активность, сезонные группы.

On the Seasonal Activity of Odonata in Central Yakutia

L.V. Sivtseva

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The phenology of 25 species of damselflies and dragonflies in the cryosemiarid conditions of Central Yakutia is studied. Total flight activity of the imago is continued during 5 months from May to September. Six seasonal groups are revealed: hibernating – the first 10 days of May – the last 10 days of August (Sympecma paedisca), late spring-summer – the last 10 days of May – the last 10 days of July (3 species), late spring-late summer – the last 10 days of May – the last 10 days of August (1), summer – 10 days in the middle of June – the last 10 days of July (9), summer-late summer – 10 days in the middle of June – the first 10 days of September (9), and the summer-autumn – 10 days in the middle of July – the last 10 days of September (2 species). Emergence of damselflies and dragonflies from reservoirs occur within seventy days from the last 10 days of May to the last 10 days of July and their greatest diversity (25 species) is observed in the period from the 11th to the end of July. The period of seasonal flight activity of adults Odonata in the investigated area essentially does not differ from the period of flight in the North-East of the European part of Russia. The terms of flight of damselflies and dragonflies in the Central Yakutia, in comparison with phenological data of the north of the Far East appear longer for a month, and is shorter for a month than in the south of Siberia and the Far East.

Key words: Yakutia, Central Yakutia, damselflies, dragonflies, adults, phenology, flight activity, seasonal groups.

Сезонная динамика лёта стрекоз рассматривалась отечественными одонатологами в некоторых регионах Сибири и Дальнего Востока, где, как оказалось, преимущественно под влиянием климатических условий, формируются свои сезонные группы и устанавливается характерная для них ритмичность в развитии фауны стрекоз. К примеру, для Тункинской котловины было выделено 8 сезонных групп [1], Кузнецкой котловины – 5 [2], Южного Приморья – 4 [1], севера и юга Дальнего Востока – 3 и 7 соответственно [3–5]. Между тем особенности лётной активности этих насекомых в Якутии до наших исследований практически не изучались. В 1963 г. Белишев [1, 6, 7] отмечал вылет первых видов стрекоз в Якутске 12 июня, а около Жиганска – 29 июня, что соответственно на 10 и 27 дней позже по сравнению со сроками вылета стрекоз в Тункинской котловине [1]. Однако эти наблюдения проводились на примере ограниченного числа видов в летний сезон, и реальные сроки начала и завершения лётной активности стрекоз не были установлены.

Резко континентальный климат Якутии обуславливает быструю смену погодных режимов

при переходе от одного сезона к другому. В особенности резким изменениям подвержена температура воздуха [8], которая является основным фактором, влияющим на сроки начала и окончания лётной активности стрекоз [1, 9]. Поскольку сезонная ритмика лёта – один из адаптивных механизмов стрекоз к сезонным изменениям среды [9], сроки развития и появления имаго могут меняться в разные годы в зависимости от погодных особенностей и температурных условий, что характерно в целом для всех насекомых [10].

Очевидно, немаловажное значение имеет и температурный режим водоемов, в которых проходит развитие преимагинальных фаз. Так, Д.И. Берман и А.В. Алфимов [11] показали, что на Северо-Востоке Сибири в условиях криолитозоны в мелких озерах и болотах создаются такие же благоприятные условия для развития амфибионтных животных (например, сибирского углозуба), как и в таких же водоемах лесостепной зоны.

Материал и методика

Изучение сезонной активности лёта стрекоз велось с 2007 по 2014 г. в окрестностях г. Якутск

на следующих стационарных площадках: 1) 13-й км Покровского тракта, устье ручья Хорогор, проточное озеро – старица; 2) Якутский ботанический сад (далее – Ботсад) Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (далее – ИБПК), оз. Ытык-Кюель; 3) 13-й км Вилуйского тракта, оз. Тэмийэ; 4) 26-й км Вилуйского тракта, орнитологический стационар ИБПК, площадка №2 «Лено-Вилуйское междуречье».

Кроме того, собственные фенологические данные из разных частей Центральной Якутии, полученные в ходе маршрутных наблюдений, дополнены материалами, собранными энтомологами лаборатории систематики и экологии ИБПК.

Сбор имаго произведен по стандартной методике энтомологическим воздушным сачком, сбор личинок – водным сачком. Видовая диагностика имаго и личинок стрекоз проведена по определителю Бельшева [12] и атласу-определителю Скворцова [13].

Результаты и обсуждение

По нашим наблюдениям, стрекозы летают в течение теплого времени года, который в Центральной Якутии длится с начала мая до конца сентября [8]. За это время происходит смена весеннего, летнего и осеннего климатических сезонов, сроки наступления и особенности погодных условий которых выражены достаточно четко [8, 14].

Весна. Продолжается в течение полутора месяцев и протекает с середины апреля по конец мая после перехода дневной (в 13 ч) температуры воздуха через 0°C и среднесуточной температуры через 10°C. В этом сезоне также возможны возвраты отрицательных значений температур до –20°C вследствие вторжения холодных арктических масс [14]. Последнюю неделю мая, когда появляются первые весенние виды, мы относим к поздней весне. В весенний период существенно отличаются температурные условия и сроки разрушения льда в водоемах различного типа. Так, в мелких озерах и болотах, по нашим данным, вода может нагреваться до 9°C в дневные часы. Такие водоемы освобождаются от ледяного покрова уже в начале мая, тогда как в это же время глубокие и крупные озера практически полностью остаются подо льдом и температура воды в них равна всего 1,4–2°C. Более раннему вскрытию мелких озер в весенний период способствует проникающая через толщу льда солнечная радиация [15]. Высокие температуры в них поддерживаются благодаря теплоизолирующим свойствам донного ила [11].

Лето. Наиболее продолжительный по времени сезон, охватывающий период с июня по август. К этому времени полностью прекращаются замо-

розки и устанавливается безморозный период со среднесуточными температурами выше 10°C. В середине лета в июле среднесуточная температура воздуха колеблется от 15 до 25°C, а дневная повышается до 30°C и выше. Такие температурные условия при низком количестве выпадающих осадков (5–40 мм за июль) приводят к заболачиванию или высыханию мелких водоемов. В августе наблюдается так называемое «летнее охлаждение озер», когда температура воды начинает постепенно понижаться [16]. Так, если по нашим измерениям, в первой декаде августа температура в среднем достигает 21°C, во второй – 17,8°C, то в третьей декаде этот показатель равен 16°C. С этого времени число летающих видов стрекоз заметно сокращается – исчезают все поздневесенне-летние и большинство летних видов, разнообразие стрекоз заметно сокращается. В связи с такими особенностями лета стрекоз август мы выделяем в позднее лето.

Осень. Сезон длится с конца августа, когда возобновляются заморозки и среднесуточные температуры воздуха становятся ниже 10°C, и заканчивается в октябре с наступлением зимы. Для стрекоз в зависимости от погодных условий осени длится по-разному. В дождливую и холодную осень с низкими среднесуточными температурами воздуха и отрицательными значениями ночных температур стрекозы исчезают уже в начале сентября. При более благоприятных условиях погоды лёт стрекоз наблюдается до начала третьей декады сентября. Среднесуточные температуры воздуха первой декады сентября в разные годы наших исследований составили от 6 до 10°C, второй – 2–8°C и конца сезона – 0–7°C. Суточные температуры воды по сравнению с атмосферными показателями, наоборот, оказываются на 1–3°C выше. Например, в первой декаде сентября температура поверхности воды по нашим данным равнялась 10,8°C, во второй – 6,7°C и в третьей декаде – 5,8°C.

По календарным срокам появления и исчезновения в природе 25 видов из распространенных по Центральной Якутии 28 видов стрекоз 6 семейств [17] укладываются в 6 фенологических групп: зимующую, поздневесенне-летнюю, поздневесенне-позднелетнюю, летнюю, летне-позднелетнюю и летне-осеннюю.

1. Зимующая группа (1 вид). Единственным представителем этой группы является зимующий в имагинальной фазе вид *Symptesta paedisca* [1]. Его имаго активны практически весь теплый сезон и отмечались нами с начала мая до конца августа, хотя, возможно, летают и в сентябре. Сроки появления перезимовавших особей этого вида весной значительно меняются в зависимости от погодных условий года. Самые ранние вы-

леты отмечены в 2011 и 2013 гг. при среднесуточных температурах воздуха 10–12°C. Тогда единичные стрекозы начали летать уже с первых чисел мая. Весной 2008, 2009 и 2012 гг. наблюдался неблагоприятный для стрекоз температурный режим с низкими среднесуточными температурами от 2 до 8°C, и в эти годы лёт стрекозы начался практически одновременно с вылетом видов поздневесенне-летней и поздневесенне-поздне-летней групп. *Sympecma paedisca* – это единственный в Сибири вид, у которого в течение всего лётного периода отмечается чередование поколений. Так, по данным Бельшева [1], перенесшие зиму особи летают до конца июня, а в августе происходит вылет нового поколения вида, т.е. между сменой поколений существует разрыв в один месяц. Между тем, по нашим наблюдениям, перезимовавшее поколение летает, по крайней мере, до 18 июля, а появление молодых имаго регистрировалось с 23 июля. Подобный непрерывный лёт, когда одно поколение вида сменяет другое практически без разрыва во времени, выявлен в Кузнецкой котловине [2], Алтае [18] и Туве [19].

2. Поздневесенне-летняя группа (3 вида). Объединяет виды, летающие с третьей декады мая до конца июля. К ней относятся *Coenagrion armatum*, *C. lunulatum* и *Leucorrhinia intermedia*. Вылет этих видов стрекоз согласуется с фазой зацветания черемухи, что отмечалось Бельшевым [1] в Южном Прибайкалье и низовье Лены в окрестностях Жиганска. Так, в Якутске, по данным Даниловой и др. [20], в 2010 и 2011 гг. черемуха зацвела 28 мая и в эти годы имаго стрекоз регистрировались с 29 мая. В 2012 г. цветение черемухи началось с 6 июня – эти виды стрекоз вылетели 7 июня.

3. Поздневесенне-позднелетняя группа (1 вид). К этой группе относится *Leucorrhinia orientalis*, который летает с третьей декады мая до конца августа. Даты появления имаго этой стрекозы в Центральной Якутии оказались близки к сроку вылета, указанного Бельшевым [1] в приалтайских степях, и опережают таковые в Южном Прибайкалье на 7 дней, а в Приморье на 15 дней.

4. Летняя группа (9 видов). Включает виды, которые начинают летать со второй декады июня до конца июля (*Coenagrion hylas*, *C. glaciale*, *C. ecornutum*, *C. hastulatum*, *Epithea bimaculata*) или самого начала августа (*Erythromma najas*, *Cordulia aenea*, *Somatochlora exuberata* и *Somatochlora graeseri*). В отличие от видов весенней фауны, вылет этих видов за годы исследований, несмотря на различные погодные условия начала лета, отмечается практически в одно и то же время. Например, массовый выплод личинок *Epi-*

thea bimaculata на берегу озера Ытык-Кёль в Ботсаду наблюдался в 2010 г. 16 июня, в 2011 г. 13 июня, а в 2014 г. 17 июня. Близкие сроки окрыления отмечаются также у другого вида этого фаунистического комплекса *Erythromma najas*, который ежегодно вылетает в середине июня.

5. Летне-позднелетняя группа (9 видов). Группа объединяет виды, которые появляются практически одновременно с представителями предыдущей группы, но в отличие от них продолжают летать до середины или конца августа, а некоторые виды захватывают и начало сентября. Со второй декады июня вылетают *Enallagma cyathigerum*, *Coenagrion johanssoni*, *Aeshna juncea* и *Libellula quadrimaculata*, а в последнюю декаду вылетают еще 5 видов – *Lestes dryas*, *L. sponsa*, *Aeshna serrata*, *A. crenata* и *Sympetrum flaveolum*. Отмеченные нами даты вылета *Sympetrum flaveolum* существенно разнятся с указанными Бельшевым [6, 7] сроками выплода вида около Якутска, который наблюдался им 24 июля. Так, по нашим данным, этот вид начинает летать с конца июня – начала июля, что совпадает со сроками вылета этого вида на европейском Северо-Востоке [21] и на юге Западной Сибири в приалтайских степях и долине Оби [1]. Например, в 2008 г. массовый выплод вида отмечен нами 24 июня, в 2012 г. 6 июля и 2014 г. 3 июля. В середине июня с наступлением устойчиво жарких дней с дневными температурами воздуха выше 25°C начинает летать *Aeshna juncea*. На северо-восточной периферии рассматриваемой территории – в низовье Алдана этот вид начинает летать несколько позже, чем в долине Лены в окрестностях Якутска. Так, в 2008 г. в Якутске окрыление наблюдалось 18 июня, тогда как в низовье Алдана первые имаго появились с 24 июня. Сроки завершения лёта у видов этой группы также разные. В середине августа исчезают 4 вида, 3 вида летают до конца августа и два вида (*Aeshna serrata* и *Sympetrum flaveolum*) встречаются еще и в самом начале сентября.

6. Летне-осенняя группа. Малочисленная по составу группа включает два вида, лёт которых отмечается с середины или конца июля, и при благоприятных погодных условиях осени летающих до второй или начала третьей декад сентября. Это *Sympetrum vulgatum* и *S. danae*. К примеру, первый вид летает до середины сентября, а для второго вида крайней датой встреч является 23 сентября.

Недостаток материала не позволил установить сроки начала и окончания лёта редких для Центральной Якутии видов *Coenagrion lanceolatum*, *Nihonogomphus ruptus*, *Aeshna caerulea* и *A. subarctica*. Однако, учитывая, что «... продолжи-

тельность активности имаго гипоарктобореальных видов в тайге и тундре менее изменчива...» [21, с. 196], и указывая на близкие сроки вылета *A. subarctica* в Центральной Якутии (26 июня) и европейском северо-востоке России (30 июня), можно предположить, что *A. subarctica* войдет в группу летне-позднелетних видов. В будущем, при получении новых данных, также не исключается возможность перехода некоторых видов из одной группы в другую.

При благоприятных погодных условиях, особенно весны и осени, общий период лёта стрекоз в Центральной Якутии продолжается с первой декады мая до начала третьей декады сентября. В течение этого времени, в зависимости от доминирования тех или иных фенологических групп, складывается характерный для каждого сезона облик одонатофауны. Так, первые две декады мая фауна стрекоз представлена исключительно зимующим видом *Symptesta paedisca*. В третьей декаде мая к ним присоединяются виды весенней фауны, летающие до июля или августа. Такой фаунистический состав стрекоз не меняется до начала июня – основу этого периода составляют поздневесенне-летние виды (60%). Затем, со второй декады июня до первой декады августа в фауне начинают доминировать летние и летне-позднелетние виды – до 73% видового состава. В августе наблюдается замещение летней фауны на позднелетнюю (52–69%), исчезают все поздневесенне-летние виды, а со второй декады и все летние виды. В конце теплого периода в третьей декаде августа число летне-позднелетних видов сокращается почти вдвое – продолжают летать всего 5 видов.

В условиях криосемиаридного климата Центральной Якутии вылет стрекоз из водоемов наблюдается в течение 7 декад от третьей декады мая до третьей декады июля. В третьей декаде мая вылетают 4 первых вида, которые отмечаются до конца июля или августа. Наиболее стремительное нарастание видового разнообразия наблюдается во второй декаде июня, когда сразу появляется 12 видов стрекоз. В конце июня вылетают еще 6 видов. Затем во второй и третьей декадах июля появляется по одному виду. Одновременно с последним летне-осенним видом вылетает новое поколение зимующего вида. Видовое разнообразие одонатофауны в этот момент достигает своего максимума, когда одновременно летает 25 видов. На этом развитие фауны стрекоз завершается – в последующем новые виды уже не появляются, а продолжают летать только ранее встречаемые. Отмирание имаго стрекоз происходит в следующей последовательности. Первыми, в середине июля, исчезают перезимовавшие особи *Symptesta paedisca*, в тре-

тей декаде июля выпадают 8 видов весенней и летней фауны. После чего наблюдается равномерное сокращение видового разнообразия – в первой и второй декадах августа исчезают по 4 вида, в третьей – 5. Из оставшихся 4 видов, последним, в начале третьей декады сентября, прекращает лёт летне-осенний вид *Sympetrum danae*.

Таким образом, в Центральной Якутии установлены сроки начала и завершения лёта 25 видов стрекоз. Общая продолжительность активности лёта имаго на этой территории не превышает 5 месяцев, и существенно не отличается от такового в других частях континента вне зоны многолетней мерзлоты, лежащих на той же широте, например, с северо-востоком европейской территории России [21]. Однако при рассмотрении в долготном направлении фенологии лёта отдельно взятого вида, например *Libellula quadrimaculata*, прослеживается закономерность, показанная Бельшевым и др. [9, с. 73] «...с продвижением на восток сезон активности четырехпятнистой стрекозы отодвигается в сторону осени в результате смещения сроков появления имаго...». Так, более поздний вылет в середине июня и раннее прекращение лёта в середине августа, по сравнению с европейской частью России, укорачивает сезон активности вида в Центральной Якутии почти на 2 месяца. Если же сравнивать фенологические данные исследованного района с севером Дальнего Востока [4], то период лётной активности здесь оказывается длиннее на месяц. Напротив, по сравнению с югом Сибири и Дальнего Востока [2–5, 9] сезон лёта имаго в Центральной Якутии оказывается короче на месяц. При этом такое сокращение происходит за счет более раннего исчезновения видов осенью, тогда как начало вылета видов весной отмечается практически в одно и то же время.

Автор выражает благодарность д.б.н. Н.Н. Винокурову за ценные консультации и помощь в работе над статьей, всем сотрудникам лаборатории систематики и экологии беспозвоночных ИБПК СО РАН за предоставленный для изучения одонатологический материал, собранный в разные годы в Центральной Якутии.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0376-2014-0001. Тема 51.1.4 «Животное население приарктической и континентальной Якутии: видовое разнообразие, популяции и сообщества (на примере низовьев и дельты рек Лены, тундр Яно-Индигиро-Колымского междуречья, бассейна Средней Лены и Алдана)».

Литература

1. Бельшев Б.Ф. Стрекозы Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – Т. 2, ч. 3. – 351 с.

2. Дронзикова М.В. Стрекозы бассейна реки Томи (Состав и распределение фауны, экологические и этологические особенности видов): Дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 2000. – 249 с.
3. Иванов П.Ю. Фауна, систематика и распространение стрекоз (Odonata) юга Российского Дальнего Востока: Дис. ... к.б.н. – Владивосток, 2003. – 252 с.
4. Маликова Е.И. Стрекозы (Odonata, Insecta) Дальнего Востока России: Автореф. дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 1995. – 25 с.
5. Маликова Е.И. Сезонная динамика лета имаго стрекоз (Odonata, Insecta) на Дальнем Востоке России // Ученые записки БГПУ. Естественные науки. – 1999. – Т. 18, вып. 1. – С. 30–38.
6. Бельшиев Б.Ф. Фенология лета стрекоз (Odonata, Insecta) в заполярной Сибири и некоторые общие закономерности этого явления на севере Палеарктики // Зоологический журнал. – 1965. – Т. 44, №7. – С. 1014–1017.
7. Бельшиев Б.Ф. Одонатофауна долины реки Норды в Заполярной Сибири // Фауна Сибири: труды Биологического института СО АН СССР. – 1973. – Вып. 16. – С. 24–31.
8. Витвицкий Г.Н. Климат / Якутия. – М.: Наука, 1965. – С. 115–143.
9. Бельшиев Б.Ф., Харитонов А.Ю., Борисов С.Н. и др. Фауна и экология стрекоз. – Новосибирск: Наука, 1989. – 207 с.
10. Добровольский Б.В. Фенология насекомых. – М.: Высшая школа, 1969. – 232 с.
11. Берман Д.И., Алфимов А.В. Не холодно ли углозубу на вечной мерзлоте? // Природа. – 2012. – №3. – С. 35–45.
12. Бельшиев Б.Ф. Определитель стрекоз Сибири по имагинальным и личиночным фазам. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 114 с.
13. Скворцов В.Э. Стрекозы Восточной Европы и Кавказа: Атлас-определитель. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. – 623 с.
14. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1973. – 118 с.
15. Арэ Ф.Э. Температурный режим озер Центральной Якутии в весенний период // Вопросы географии Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1969. – Вып. 5. – С. 73–77.
16. Арэ Ф.Э. Тепловой режим мелких озер таежной зоны Восточной Сибири (на примере Центральной Якутии) // Озера криолитозоны Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 98–116.
17. Сивцева Л.В. Новые данные к фауне стрекоз (Odonata) Центральной Якутии // Евразийский энтомологический журнал. – 2010. – 9 (2). – С. 295–298.
18. Костерин О.Э. Население стрекоз Манжерокского озера // Проблемы формирования животного населения наземных и водных биоценозов. – Омск: Изд-во ОГПИ, 1987. – С. 76–92.
19. Костерин О.Э., Заика В.В. Фауна стрекоз (Odonata) Тувы // Амурский зоологический журнал. – 2011. – Т. 3, №3. – С. 210–245.
20. Данилова Н.С., Коробкова Т.С., Семенова В.В. и др. Дикie родичи культурных растений Якутии и их охрана. – Новосибирск: Наука, 2014. – 248 с.
21. Татаринцов А.Г., Кулакова О.И. Стрекозы. Фауна европейского Северо-Востока России. – СПб.: Наука, 2009. – Т. 10. – 213 с.

Поступила в редакцию 12.08.2015

УДК 631.674:631.432.2+633.253(282.256.6)

Влияние вегетационных поливов на режим влажности почвы и продуктивность овса в долине р. Лены

Д.Д. Саввинов*, Г.Н. Саввинов**, П.П. Данилов**, А.А. Петров**, В.С. Макаров**,
Х.И. Максимова***, М.П. Макарова**, Д.В. Ковальский****

*Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск

**НИИПЭС Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

***Якутский НИИ сельского хозяйства, г. Якутск

****Средняя образовательная школа № 7, г. Якутск

Летом 2015 г. были проведены исследования режима влажности мерзлотной лугово-черноземной почвы в условиях богары и орошения в местности «Мойдоох» агрофирмы «Немюгю» (в 3 км от г. По-

*САВВИНОВ Дмитрий Дмитриевич – д.б.н., проф., акад. АН РС (Я), советник АН РС (Я); **САВВИНОВ Григорий Николаевич – д.б.н., директор; **ДАНИЛОВ Петр Петрович – к.б.н., с.н.с.; **ПЕТРОВ Алексей Анатольевич – к.б.н., м.н.с.; **МАКАРОВ Виктор Семенович – к.б.н., с.н.с.; *** МАКСИМОВА Христина Ивановна – к.с.-х.н.; МАКАРОВА Мария Петровна – аспирант; ****КОВАЛЬСКИЙ Дмитрий Владимирович – Учитель.

2. Дронзикова М.В. Стрекозы бассейна реки Томи (Состав и распределение фауны, экологические и этологические особенности видов): Дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 2000. – 249 с.
3. Иванов П.Ю. Фауна, систематика и распространение стрекоз (Odonata) юга Российского Дальнего Востока: Дис. ... к.б.н. – Владивосток, 2003. – 252 с.
4. Маликова Е.И. Стрекозы (Odonata, Insecta) Дальнего Востока России: Автореф. дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 1995. – 25 с.
5. Маликова Е.И. Сезонная динамика лета имаго стрекоз (Odonata, Insecta) на Дальнем Востоке России // Ученые записки БГПУ. Естественные науки. – 1999. – Т. 18, вып. 1. – С. 30–38.
6. Бельшиев Б.Ф. Фенология лета стрекоз (Odonata, Insecta) в заполярной Сибири и некоторые общие закономерности этого явления на севере Палеарктики // Зоологический журнал. – 1965. – Т. 44, №7. – С. 1014–1017.
7. Бельшиев Б.Ф. Одонатофауна долины реки Норды в Заполярной Сибири // Фауна Сибири: труды Биологического института СО АН СССР. – 1973. – Вып. 16. – С. 24–31.
8. Витвицкий Г.Н. Климат / Якутия. – М.: Наука, 1965. – С. 115–143.
9. Бельшиев Б.Ф., Харитонов А.Ю., Борисов С.Н. и др. Фауна и экология стрекоз. – Новосибирск: Наука, 1989. – 207 с.
10. Добровольский Б.В. Фенология насекомых. – М.: Высшая школа, 1969. – 232 с.
11. Берман Д.И., Алфимов А.В. Не холодно ли углозубу на вечной мерзлоте? // Природа. – 2012. – №3. – С. 35–45.
12. Бельшиев Б.Ф. Определитель стрекоз Сибири по имагинальным и личиночным фазам. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 114 с.
13. Скворцов В.Э. Стрекозы Восточной Европы и Кавказа: Атлас-определитель. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. – 623 с.
14. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1973. – 118 с.
15. Арэ Ф.Э. Температурный режим озер Центральной Якутии в весенний период // Вопросы географии Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1969. – Вып. 5. – С. 73–77.
16. Арэ Ф.Э. Тепловой режим мелких озер таежной зоны Восточной Сибири (на примере Центральной Якутии) // Озера криолитозоны Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 98–116.
17. Сивцева Л.В. Новые данные к фауне стрекоз (Odonata) Центральной Якутии // Евразийский энтомологический журнал. – 2010. – 9 (2). – С. 295–298.
18. Костерин О.Э. Население стрекоз Манжерокского озера // Проблемы формирования животного населения наземных и водных биоценозов. – Омск: Изд-во ОГПИ, 1987. – С. 76–92.
19. Костерин О.Э., Заика В.В. Фауна стрекоз (Odonata) Тувы // Амурский зоологический журнал. – 2011. – Т. 3, №3. – С. 210–245.
20. Данилова Н.С., Коробкова Т.С., Семенова В.В. и др. Дикie родичи культурных растений Якутии и их охрана. – Новосибирск: Наука, 2014. – 248 с.
21. Татаринцов А.Г., Кулакова О.И. Стрекозы. Фауна европейского Северо-Востока России. – СПб.: Наука, 2009. – Т. 10. – 213 с.

Поступила в редакцию 12.08.2015

УДК 631.674:631.432.2+633.253(282.256.6)

Влияние вегетационных поливов на режим влажности почвы и продуктивность овса в долине р. Лены

Д.Д. Саввинов*, Г.Н. Саввинов**, П.П. Данилов**, А.А. Петров**, В.С. Макаров**,
Х.И. Максимова***, М.П. Макарова**, Д.В. Ковальский****

*Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск

**НИИПЭС Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

***Якутский НИИ сельского хозяйства, г. Якутск

****Средняя образовательная школа № 7, г. Якутск

Летом 2015 г. были проведены исследования режима влажности мерзлотной лугово-черноземной почвы в условиях богары и орошения в местности «Мойдоох» агрофирмы «Немюгю» (в 3 км от г. По-

*САВВИНОВ Дмитрий Дмитриевич – д.б.н., проф., акад. АН РС (Я), советник АН РС (Я); **САВВИНОВ Григорий Николаевич – д.б.н., директор; **ДАНИЛОВ Петр Петрович – к.б.н., с.н.с.; **ПЕТРОВ Алексей Анатольевич – к.б.н., м.н.с.; **МАКАРОВ Виктор Семенович – к.б.н., с.н.с.; *** МАКСИМОВА Христина Ивановна – к.с.-х.н.; МАКАРОВА Мария Петровна – аспирант; ****КОВАЛЬСКИЙ Дмитрий Владимирович – Учитель.

кровск) на территории Хангаласского района РС (Я). Год оказался крайне засушливым, в связи с чем на богарном участке вследствие острого дефицита влаги в корнеобитаемом слое урожай зеленой массы овса составил около 70 ц/га, тогда как на орошаемом, благодаря проведенным вегетационным поливам (оросительная норма 900 м³/га), урожай был в 1,5 раза выше, чем на богаре. Общее водопотребление влаги за период с 18 июня по 18 августа 2015 г. на орошаемом составило 132 мм, а на неорошаемом – 65 мм. При этом на обоих участках основной расход влаги шел из верхней полуметровой почвенной толщи.

Ключевые слова: почва, общий расход влаги, урожай зеленой массы растений, оросительная норма, поливная норма.

Influence of Vegetation Irrigation on Soil Moisture Regime and Productivity of Oats in the Lena River Valley

D.D. Savvinov*, G.N. Savvinov**, P.P. Danilov**, A.A. Petrov**, V.S. Makarov**,
H.I. Maksimova***, M.P. Makarova**, D.V. Kovalsky****

*Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk

** North-Eastern Federal University, Yakutsk

*** The Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakutsk

****General High School No.7, Yakutsk

In the summer of 2015 moisture regimes of permafrost meadow-chernozem soil under rainfed and irrigation in the area «Moydooh» of the agricultural firm «Nemyugyu» (3 km from the town of Pokrovsk) in the Khan-galassky district of the Republic of Sakha (Yakutia) were studied. Summer of 2015 was extremely dry, and therefore on rainfed area due to extreme shortage of moisture in the root zone the crop of green mass of oats was 70 kg / ha., while at the irrigated ones thanks to irrigations (irrigation rate of 900 m³/ha.), the yield was 1.5 times higher. For the period from the 18th of June to the 18th of August 2015 the total water consumption in the irrigated area was 132 mm, and in the rainfed area – 65 mm. At the same time at both sites the main quantity of moisture was coming from the top half-meter of the soil strata.

Key words: soil, total consumption of water, yield of green mass of plants, irrigation rate, irrigation norm.

Введение

В условиях засушливого климата Центральной Якутии продуктивность животноводства, особенно крупного рогатого скота, зависит не только от урожайности естественных трав, но и кормовых культур. Последние обеспечивают высокий уровень питательных веществ в кормовом рационе животных. В этом отношении особую роль играет овёс, который характеризуется относительно неприхотливыми требованиями к почвенным агрохимическим условиям возделывания и более приспособлен к местному экстремальному климату. Естественно для получения стабильных высоких урожаев возделываемых культур здесь не хватает достаточной суммы атмосферных осадков [1]. В этом отношении овёс не представляет исключения. Так, в основных земледельческих районах Центральной Якутии максимальная урожайность зеленой массы овса не превышает 150 ц/га, тогда как по данным [2] в Магаданской области она может достигать 400 ц/га, где годовое суммарное количество осадков почти в 2 раза превышает количество осадков в нашем регионе.

По исследованиям, проведенным нами в 70-е гг. на территории Ботанического сада Института биологических проблем Севера СО РАН, овес хорошо отзывается на вегетационные поливы [3]. Причем по многолетним наблюдениям, проведенным в различных опытно-показательных хозяйствах Якутского сельскохозяйственного института СО РАСХН (ныне ФГУ ЯНИИСХ РАН), наибольший урожай зеленой массы данных культур получен при позднем сроке посева, так как в первой половине теплого сезона идет процесс накопления нитратов [4].

Овес занимает в кормовом рационе крупного рогатого скота Якутии (в составе дополнительного корма в виде силосных культур) заметную его часть. Поэтому овёс остается как основная силосная культура, пока более высокоурожайные кормовые культуры не займут его место в производстве. Выгодность его возделывания связана еще и с тем, что тепловые ресурсы воздуха и почвы не являются главным лимитирующим фактором его нормального развития. Во всяком случае овёс можно возделывать почти на всех типах почв, используемых в Центральной Якутии в земледелии.

Тем не менее, за последние годы в республике резко сократились площади кормовых культур, в том числе и овса. Это явилось одной из главных причин снижения общего объема молочных продуктов в нашем регионе.

Учитывая это, мы провели исследования по выявлению влияния вегетационных поливов на режим расхода почвенной влаги под посевами овса и его урожайности.

Методика и объекты исследований

Полевые опыты проводились на мерзлотно-лугово-черноземных суглинистых почвах, расположенных на второй надпойменной террасе реки Лены, на участке «Мойдоох» агрофирмы «Немюгю», в 3 км от г. Покровска (в 70 км от г. Якутска). Наблюдательные площадки за вегетационными поливами овса (сорт «Покровский») на зеленку и на богаре размещались в пределах территории пятипольного кормового севооборота:

- 1) овёс (сорт Покровский 9) на зеленку – озимая рожь (сорт Ситниковский);
- 2) озимая рожь, овес на зеленый конвейер или на зерносенаж;
- 3) викоовсяная смесь на силос и сенаж;
- 4) просо кормовое «Баганское 88» на силос и сенаж;
- 5) люцерна Якутская желтая + пырейник сибирский.

Площадь делянки по вариантам удобрений 21 м², длина 7 м, ширина 3 м. Наблюдения проводились на делянках, где вносились удобрения (НРК)₆₀ кг/га д.в.

Агротехника возделывания кормовых культур

тур общепринят по «Системе ведения сельскохозяйственного производства Республики Саха (Якутия) на период до 2015 г.» [5].

Закрытие влаги проводилось 8 мая дисковой бороной БДН -3,0 на глубину 8 см, внесение минеральных удобрений – 20 мая с последующей заделкой, посевная обработка почвы – 28 мая бороной дисковой навесной БДН-0,3 с последующим боронованием БЗТ-0,1. Посев овса проводился 4 июня сеялкой СНПП-16 на глубину 4–5 см с последующим прикатыванием кольчатым катком. Полив проведен дождевальным агрегатом КИ-5 в основные фазы развития растений. Уборка зеленой массы овса проведена сплошным методом 14 августа.

Учеты и наблюдения за биопродуктивностью проводились, согласно методике ВНИИ кормов по проведению полевых опытов.

Норма высева овса 200 кг/га в чистом виде, вики в смеси 70 кг/га, овса в смеси 130 кг/га, проса 25–30 кг/га, озимой ржи в смеси 150 кг/га и костреца безостого в смеси 12 кг/га.

Полевая влажность почвы определялась в четырехкратной повторности весовым методом, а агрофизические свойства почв – по общероссийской методике почвенных исследований.

Обсуждение результатов исследований

По метеорологическим условиям (по данным ст. Покровск) среднемесячная температура в мае оказалась на 1,5°С выше многолетней нормы, а в июне – почти на 2,0°С. Средняя месячная температура июля не отличалась от многолетней нормы, тогда как в августе была, наоборот, на 2,0°С ниже нормы.

Расход почвенной влаги под посевом овса (мм) на участке «Мойдоох» Хангаласского района. Лето 2015 г.

Слой, см	18.06	29.06	Приход (+), расход (-)	13.07	Приход (+), расход (-)	03.08	Приход (+), расход (-)	18.08	Приход (+), расход (-)
Площадка 1 (вегетационный полив)									
0–20	28	27	-1	18	-9	20	+2	22	+2
20–30	55	50	-5	44	-6	42	-2	44	+2
0–50	83	77	-6	62	-15	62	0	66	+4
50–100	114	114	0	114	0	112	-2	113	+1
0–100	197	191	-6	176	-15	174	-2	179	+5
Осадки, мм		15		6		0		3	
Полив, мм		-		30		30		30	
Общий расход		21		51		32		28	
Суточный расход		1,9		3,6		1,5		3,9	
Площадка 2 (без полива)									
0–20	33	27	-6	21	-6	15	-6	14	-1
20–30	50	50	0	49	-1	46	-3	45	-1
0–50	83	77	-6	70	-7	61	-9	59	-2
50–100	134	134	0	124	-10	124	0	120	-4
0–100	217	211	-6	194	-17	185	-9	179	-6
Осадки, мм		15		6		0		3	
Общий расход		21		23		9		12	
Суточный расход		1,9		1,6		0,8		0,8	

Суммарное количество атмосферных осадков в мае было на 2,2 мм больше многолетней нормы, а в июне, наоборот, на 4,3 мм меньше. Особенно мало осадков выпало в июле и августе, соответственно, на 40 и 30 мм ниже средней многолетней нормы.

Таким образом, вторая половина вегетационного сезона оказалась чрезвычайно засушливой.

По фенологическим наблюдениям период посева–всходы составил 11 дней, дата наступления полных всходов отмечалась 15 июня. Межфазный период всходы – кущение составил 12 дней (полное кущение отмечалось 26 июня), продолжительность периода кущение – выход в трубку – 9 дней. Период выхода в трубку – выметывание продлился 9 дней и дата наступления фазы выметывания отмечалась 16 июля, фаза цветения – 24 июля, фаза молочной спелости – 4 августа.

Как видно из данных таблицы, к моменту посева овса корнеобитаемая толща почвы оказалась довольно иссушенной. Поэтому общий расход почвенной влаги из 50-сантиметрового слоя был сравнительно незначительным на обеих площадках.

Так, на площадке 1 (где проводились вегетационные поливы) за период с 18 по 29 июня общий расход влаги составил 21 мм, а на площадке 2 (контроль, где поливы не проводились) – также 21 мм. Следует сразу заметить, что на контрольной площадке вследствие большой засушливости почвы и малого выпадения атмосферных осадков в основной период вегетации растений расход почвенной влаги из корнеобитаемой толщи был крайне малым. Здесь биологическая масса была незначительной, поэтому непродуктивный расход влаги (физическое испарение почвенной влаги) очевидно занимал заметную часть в общей потере почвенной влаги. Тогда как на площадке 1, где проводилось орошение поливной нормой 300 м³/га по основным фазам развития растительности, со времени первого полива общий расход почвенной влаги почти в 2 раза превышал расход на контрольной площадке. Так с 29 июня по 13 июля расход почвенной влаги на площадке 1 составил 51 мм, а на площадке 2 – 23 мм; с 13 июля по 3 августа – соответственно 32 и 9 мм; с 3 по 18 августа – 28 и 12 мм. Таким образом, в период самого интенсивного нарастания биомассы растительности водные ресурсы на площадке 2 (на богарном участке) оказались на критическом уровне, тогда как на площадке 1 благодаря проведенным вегетационным поливам удалось в какой-то мере нивелировать пагубное влияние большой атмосферной засухи лета 2015 г. на урожайность овса. Так, суточный прирост высоты растений в фазу трубкования–выметывания в варианте орошения

выше на 1,2 см, чем на контроле, а в фазу выметывания–цветения – на 0,7 см. При укосной спелости высота растений составила на контроле 43,8 см, при поливе – 61,2 см.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что основной расход влаги происходит из верхнего полуметрового слоя, тогда как потеря влаги из слоя ниже 50 см очень мизерная. Это подтверждается правильностью выводов о своеобразности водного режима почв в мерзлотных почвах [3].

Урожайность зеленой массы овса в восковой спелости зерна (14 августа) составила при поливе 102,7 ц/га, в варианте без полива 70,5 ц/га. Урожай зеленой массы овса, превышающий 100 ц/га в острозасушливые годы, в условиях Центральной Якутии считается вполне приемлемым [4,5].

Заключение

В условиях засушливого климата Центральной Якутии основным приемом регулирования водного режима пахотных почв является искусственное орошение. Особо остро в проведении поливов нуждаются кормовые культуры, дающие при благоприятном обеспечении влагой максимальные урожаи зеленой массы возделываемых культур. В этом отношении овес играет особую роль, во-первых, как культура, возделываемая почти на всех типах почв, используемых в земледелии; во-вторых, дающий довольно стабильный урожай; в-третьих, более адаптированный к суровым агроклиматическим условиям Севера. Все это позволяет утверждать, что доля овса в посеве кормовых культур не должна снижаться ниже 40% до тех пор, пока его место займут более продуктивные и приспособленные к местным суровым климатическим условиям сорта кормовых культур.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 15-44-05092.

Литература

1. *Шашко Д.И.* Климатические условия земледелия Центральной Якутии. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 264 с.
2. *Денисов Г.В.* Кормовые культуры в зоне вечной мерзлоты. – М.: Россельхозиздат, 1980. – 176 с.
3. *Саввинов Д.Д.* Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты. – Новосибирск: Наука, 1976. – 254 с.
4. *Попов Н.Т.* Полевое кормопроизводство Якутии и пути его интенсификации. – Якутск: Кн. изд-во, 1987. – 120 с.
5. *Иванов Б.И., Сухов В.А., Порядин В.М.* Биология орошаемых зерновых и кормовых растений в Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1980. – С. 98–117.

Поступила в редакцию 07.10.2015