

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 553.3/9(98)

Развитие методов исследования и решения проблем разработки месторождений твердых полезных ископаемых в Арктическом и прилегающих к нему регионах

В.Л. Яковлев

Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Обоснована актуальность исследования проблем разработки твердых полезных ископаемых в Арктическом и прилегающих к нему регионах. Изложены требующие решения проблемы, учитывающие особенности и сложности природно-климатических, горно-геологических, горно-технических и социально-экономических условий, и предложены новые подходы к освоению недр Севера. Сформулированы принципы создания и проектирования технологий освоения месторождений, включающие вопросы выбора соответствующих горно-геологическим условиям разработки выемочно-погрузочной, буровой и транспортной техники, организацию специализированной ремонтной базы, комплексного использования пород вскрыши и отходов обогащения, этапность ведения горных работ и др. В качестве основы стратегии создания и эксплуатации минерально-сырьевой базы в Арктическом и прилегающих к нему регионах является комплексность освоения недр при одновременной организации открытой инфраструктуры эксплуатирующих предприятий, что способствует комплексности освоения территорий. Предложен принципиально новый методологический подход к исследованию и проектированию технологий освоения северных территорий, основанный на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности

Ключевые слова: Арктический регион, твердые полезные ископаемые, технологии освоения месторождений.

The importance of a research of problems of mining of solid mineral deposits in the Arctic and adjacent regions is substantiated. The issues demanding solutions and considering features and difficulties of natural, climatic, mining-and-geological, mining-and-technical and social-and-economic conditions are discussed and new approaches to the development of the North depths are proposed. The principles of creation and projection of technologies of deposits development including questions of choice of excavation, loading, boring and transport technique corresponding to mining-and-geological conditions of a development, organization of a specialized repair base, complex use of overburden rocks and cleaning rejects, staging of conducting of mining operations, etc. are formulated. As a basis of the strategy of creation and exploitation of a mineral resources base in the Arctic and adjacent regions the complexity of deposits development is accepted with a simultaneous organization of open infrastructure of operating enterprises. A new methodological view on a research and projection of technologies of the northern territories development is proposed which is based on principles of system, complex, interdisciplinary approaches and innovative orientation.

Key words: Arctic region, minerals, mining technology.

Особенность современного периода социально-экономического развития России состоит в том, что в связи с распадом СССР, а затем и изменением состава СНГ, переходом от плановой к рыночной экономике, существенно изменились не только условия развития горнодобыва-

ющих отраслей промышленности, в частности возросла необходимость освоения месторождений полезных ископаемых в северных регионах Урала, Сибири и Дальнего Востока, но и потребовалось обоснование новых методологических подходов к исследованию и решению проблем разработки месторождений.

В кратком изложении эти проблемы сводятся к следующему:

ЯКОВЛЕВ Виктор Леонтьевич – д.т.н., проф., член-корр. РАН, акад. АН РС (Я), г.н.с., yakovlev@igduran.ru.

1. Более сложные условия эксплуатации вновь осваиваемых месторождений вследствие:

- природно-климатического фактора;
- удаленности от транспортных магистралей и источников энергоснабжения;
- отсутствия развитой инфраструктуры и действующих в регионе промышленных, в том числе горно-обогатительных предприятий;
- сложности горно-геологических и горно-технических условий разработки месторождений.

2. Недостаточная разведанность и геологическая изученность региона в части мест расположения месторождений, различной степени достоверной оценки балансовых, забалансовых и прогнозных запасов основных и попутных компонентов, в том числе по видам минерального сырья, по которым освоенные регионы России испытывают дефицит.

3. Специфика природно-климатических, горно-геологических, горно-технических и экологических условий разработки месторождений Арктического и прилегающих к нему регионов требуют создания новых технических средств и технологий, в том числе с использованием опыта разработки месторождений северных регионов Восточной Сибири, Якутии, Магаданской области, Кольского полуострова.

4. Использование принципиально нового методологического подхода к исследованию и проектированию технологий освоения северных месторождений, основанного на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности [1–3].

При этом новый подход требуется не только в комплексности использования недр, но и в комплексности освоения территорий (таблица).

Новые подходы к освоению недр Севера:

1. Стратегия ускоренного поэтапного освоения недр:

- ускоренное, комплексное изучение и разведка месторождений;
- экспрессная геолого-технологическая оценка горно-технических возможностей каждого рудного района;
- создание системы геоинформационного обеспечения с целью моделирования месторождений и программных комплексов для решения технологических, технических, экологических, экономических и других задач проектирования и планирования горных работ;
- приоритетность целей сокращения численности работающих за счет повышения производительности труда и отказа от непрофильных и вспомогательных производств.

2. Принцип комплексного освоения территорий:

- одна управляющая компания (холдинг) на территории административного образования с единой промышленной и социальной инфраструктурой.

С целью более сбалансированного и экономически эффективного развития минерально-сырьевой базы целесообразно предусматривать формирование горнопромышленных комплексов для разработки нескольких месторождений в каждом из районов, их расположение с единой инфраструктурой, включающей источники энергии, водоснабжения, ремонтную базу, социальную сферу и т.п.

Технология горных работ должна ориентироваться на применение специального горного и транспортного оборудования в северном исполнении с единичной мощностью, соответствующей минимуму машин и механизмов на каж-

Схема комплексных геолого-технологическо-экономических исследований при освоении и развитии минерально-сырьевой базы труднодоступных регионов

Объекты и задачи	Заказчик исследований		Результат исследований
	Государство	Частные компании	
Постановка задачи исходя из специфических целей	Геополитические задачи	Спрос на сырье, экономическая безопасность	Порядок и методы изучения объекта, региона
Оценка рудопоявлений	Ускоренная комплексная геологическая съемка и поиски	Участие трудовыми и материальными ресурсами	Экспресс-анализ ресурсов, геолого-технологическо-экономические оценки
Ресурсы полезного ископаемого	Учет и апробация, обоснование первоочередных объектов разведки	Участие в конкурсах на изучение и отработку	Предварительная оценка способов разработки, технологий переработки и лицензионных требований
Запасы категорий С ₂	Продолжение финансирования поисково-оценочных работ	Финансирование доразведки месторождения, составление ТЭО кондиций	Выработка основных условий недропользования. Организация освоения месторождения
Запасы категорий А, В, С ₁	Контроль лицензионного соглашения	Финансирование проектных работ и освоение площадки месторождения	Разработка проекта, научное сопровождение проектных работ
Эксплуатация месторождения	Контроль условий недропользования	Инвестирование добычи и переработки	Адаптация проекта, научное сопровождение работ

дом горном предприятии, с целью сокращения численности работающих.

При выборе технологий освоения месторождений полярных и приполярных регионов следует иметь в виду, что самым затратным элементом при создании минерально-сырьевой базы будет являться организация промышленной и социальной инфраструктуры.

По данным статистики, производительность труда одного работающего на горных предприятиях России не менее, чем в 6–10 раз, ниже по сравнению с аналогичными зарубежными.

Этот факт свидетельствует о том, что при существующем в стране подходе к организации горного производства, и особенно в полярных и приполярных регионах, неоправданно большие средства и ресурсы должны быть направлены на обеспечение жизненных потребностей работающих и их семей.

Основными факторами, характеризующими такой дисбаланс в производительности труда работающих на отечественных и зарубежных предприятиях, являются следующие:

1. Применение техники большой единичной мощности как на горных работах, так и при обогащении, что резко снижает численность производственного персонала.

2. Резкое снижение численности персонала, занятого при производстве ремонтных работ, за счет услуг предприятий гарантийного и послегарантийного обслуживания применяемой техники.

3. Широкое привлечение покупных услуг и арендных предприятий при выполнении вспомогательных процессов и операций, напрямую не связанных с основным производством.

4. Максимальное использование поточных технологий, предусматривающих достижение наивысшей производительности труда.

5. Использование компьютерных технологий при управлении производством и его технологической подготовке, снижающих эксплуатационные расходы не менее, чем на 8–9%, за счет лучшей организации производства и более надежного обоснования потребных ресурсов.

Отечественные горные предприятия проектируются и организуются как замкнутые самообеспечивающиеся и самонастраивающиеся производственные системы, способные функционировать независимо от внешних условий, что, соответственно, требует повышенного количества трудовых и материальных ресурсов. В отличие от этого зарубежные предприятия в наибольшей степени являются открытыми производственными системами, интегрированными в общую экономическую структуру региона и страны в целом.

Исходя из этих соображений, технологии освоения месторождений должны основываться на следующих принципах:

1. Применение высокопроизводительного оборудования большой единичной мощности, соответствующего горно-геологическим условиям разработки.

2. Применение специального горного, транспортного и вспомогательного оборудования в северном исполнении для ведения горных работ.

3. Рациональное, особенно в период строительства предприятия, использование автосамосвалов грузоподъемностью 20–60 т на гусеничном ходу, преодолевающих уклоны до 20°, технологическую подготовку к выпуску которых необходимо стимулировать уже в ближайшие годы.

4. Предпочтительно применение открытых горных работ с выделением на каждом месторождении участков разработки с минимумом горно-капитальной вскрыши на начальной стадии освоения минерально-сырьевой базы. При этом сама стратегия эксплуатации каждого месторождения должна основываться на этапности отработки и разведки с вводом предприятий на полную мощность очередями.

5. Целесообразно применение буровых станков, экскаваторов, колесных погрузчиков и вспомогательной техники с дизельным приводом, а при вводе моделей с электрическим приводом – мобильных мощных автономных источников электроэнергии, работающих на газе, мазуте, угле или местном топливе.

6. Создание узловых базисных складов ВВ общего пользования, предприятий по производству ВВ, а также специализированных взрывных организаций с целью сокращения численности персонала, обслуживающего производство взрывных работ.

7. С учетом значительных затрат на выполнение всех видов ремонтных работ необходима организация специализированной ремонтной базы и сервисного обслуживания техники с узловой заменой и ремонтом, основанных на внедрении системы учета наработки на отказ оборудования и его частей.

8. При обогащении выделение стадии предварительной подготовки полезного ископаемого к обогащению, используя при этом комплекс методов, в том числе предварительной сепарации в тяжелых средах, рентгенорадиометрической сепарации и пр. с целью выделения пустых пород и некондиционного сырья из добытой рудной массы, тем самым повышая качество исходной руды и снижая объем переработки на стадии извлечения полезных компонентов.

9. Переработка пород вскрыши и отходов предварительного обогащения на щебень для строительства дорог, производственных и жилых зданий и сооружений, а также для отправки его в нефтеносные провинции для освоения нефтегазовых месторождений и обеспечения строительства железнодорожных и автомобильных дорог, т.е. отработка всех месторождений должна максимально обеспечивать комплексное использование недр.

Таким образом, основной стратегией создания и эксплуатации минерально-сырьевой базы в Арктическом и прилегающих к нему регионах является комплексность освоения недр при одновременном налаживании открытой инфраструктуры эксплуатирующих предприятий.

Предлагается осваивать месторождения не по отраслевому принципу, а по их местонахождению на одной территории, осваивать одновременно, одной управляющей компанией. Это позволит:

- сконцентрировать все виды ресурсов;
- выстроить рациональную тактику и график освоения недр региона и их дальнейшего изучения;
- в комплексе решать проблемы региональной промышленной и социальной инфраструктуры.

В этом случае по мере развития и поэтапного роста добычи в регионе появится сеть предприятий, подготовленных к дальнейшему инвестированию развития производства. При этом конкретное предприятие может быть продано заинтересованному производителю сырья или остаться в собственности региональной управляющей компании.

Главные причины необходимости ускоренного и комплексного изучения, разведки и освоения месторождений твердых полезных ископаемых Севера:

- освоение месторождений газа и нефти с расширением инфраструктуры этих регионов возможно в комплексе с организацией или расширением добычи других видов минерального сырья, в частности строительных материалов;
- современные условия к начавшейся модернизации промышленности (металлургии, машиностроения, транспорта и т.п.), связанной с техническим перевооружением ряда отраслей, требуют, прежде всего, увеличения добычи металлов и легирующих добавок.

Основные принципы проектирования технологий освоения северных месторождений:

- этапность ведения горных работ;
- высокопроизводительное мощное оборудование, техника в северном исполнении;
- поэтапный перевод горного оборудования с дизельным приводом на электрический;

– выделение технологических зон с учетом кластерного строения рудных залежей;

– организация системы эксплуатационного опробования с целью оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения;

– комплексное использование недр за счет извлечения максимума полезных компонентов и утилизации пород вскрыши и отходов обогащения;

– комплексный подход к развитию горного и машиностроительного комплексов;

– опережающие или параллельные оценки, позволяющие заблаговременно использовать результаты работ при выработке решений, рекомендаций или формулировании основных ограничивающих условий недропользования.

Таким образом, основой стратегии создания и эксплуатации минерально-сырьевой базы Арктического и прилегающих к нему регионов является комплексность освоения недр при одновременном налаживании открытой инфраструктуры эксплуатирующих предприятий. Реализация предложенного принципа обеспечивается организацией холдинговой структуры, ответственной за создание общей промышленной инфраструктуры в районе ведения работ. Освоение месторождения по отраслевому принципу приводит к созданию замкнутой производственной системы с максимальной потребностью в трудовых ресурсах.

Одним из важнейших направлений реализации предлагаемого методического подхода к решению проблем в освоении недр субъектов Дальневосточного федерального округа является организация минерально-сырьевых центров, что актуально при дальнейших исследованиях изложенных проблем.

Литература

1. Яковлев В.Л. Методологические особенности освоения недр на современном этапе / В.Л. Яковлев, С.В. Корнилов // Вестник УрО РАН. Наука. Общество. Человек. – 2013. – № 4. – С. 43–49.
2. Яковлев В.Л. Систематизация условий размещения и освоения природных и техногенных объектов минерального сырья Уральского и Дальневосточного федеральных округов / В.Л. Яковлев, С.В. Корнилов, Ю.В. Лаптев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень: Дальний Восток. – 2013. – Отд. вып. 4. – С. 257–272.
3. Яковлев В.Л. Исторический опыт развития научных идей и методологических подходов к обоснованию технологий, параметров горных работ / В.Л. Яковлев // Проблемы недропользования. – № 3 [Электронный ресурс]: рецензируемый сборник научных статей. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – С.15–26.

Поступила в редакцию 29.01.2015

УДК 552.57+553 (571.56)

Углеродсодержащие стратонны верхнего палеозоя Куранахского антиклинория (Западное Верхоянье)

В.С. Гриненко, А.В. Прокопьев

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

В Куранахском антиклинории (Западное Верхоянье) установлены потенциально углеродистые (черносланцевые) отложения базальных горизонтов верхоянского терригенного комплекса. Выявлены коррелируемые уровни повышенной концентрации $C_{орг}$ и благороднометальной металлоносности, приуроченные к нижне-среднекарбовым трансгрессивным циклитам. Углеродистые породы характеризуются присутствием высоких концентраций сингенетического пирита и наложенной сульфидизации вкрапленного или прожилково-вкрапленного типа с повышенной золотоносностью. Результаты исследований позволяют относить потенциально углеродистые (черносланцевые) фации карбона к перспективным на формирование крупнотоннажных объектов с золото-(мышьяково)-сульфидным типом вкрапленного и прожилково-вкрапленного оруденения.

Ключевые слова: каменноугольная система, верхоянский терригенный комплекс, серджахская и чочимбальская свиты, чёрносланцевые отложения, металлоносность.

In the Kuranakh anticlinorium (West Verkhoyansk), potentially carbonaceous (black shale) deposits are recognized at the basal levels of the Verkhoyansk terrigenous complex. Correlative levels of elevated concentrations of organic C and noble metals are outlined, which are confined to the Lower-Middle Carboniferous transgressive cyclites. The carbonaceous deposits are characterized by high concentrations of syngenetic pyrite and superposed sulfidization of disseminated or vein-disseminated types with elevated gold content. The results of the studies suggest that the carbonaceous (black shale) facies are potentially prospective for the formation of high-tonnage deposits with gold-(arsenic)-sulfide type of disseminated and vein-disseminated mineralization.

Key words: Carboniferous, Verkhoyansk terrigenous complex, Sedzhakh and Chochim-Bal formations, black shale, metal content.

Объект, его изученность и методы исследований. Объектом исследований являлись верхнепалеозойские отложения, которые на востоке Сибирской платформы и в её подвижном обрамлении формируют верхоянский терригенный комплекс (ВТК) [1–11 и др.]. В Верхояно-Колымской складчатой области (ВКСО) наиболее древние отложения ВТК вскрыты в осевых частях и на крыльях Хараулахского, Орулганского, Куранахского и Бараинского антиклинориев [12–15 и др.]. И хотя степень их достоверного датирования на востоке Сибирской платформы и, нередко, на территории Верхоянья еще далека от окончательного решения, важно отметить, что наиболее полно они изучены средне- и крупномасштабными геолого-съёмочными, тематическими и поисково-разведочными работами в западной периферии ВКСО, в цен-

тральной части Куранахского и Бараинского антиклинориев, менее детально – в Хараулахском и Орулганском. Предшественниками, в пределах Куранахского и Орулганского антиклинориев, каменноугольные и пермские образования расчленены на местные стратиграфические подразделения [16, 17], стратонны диагностированы по возрасту [18 и др.] и картографированы [19 и др.]. Базальными горизонтами ВТК в Куранахском антиклинории являются нижнекаменноугольная серджахская и, согласно залегающая выше, нижне-среднекаменноугольная чочимбальская свиты [16 и др.]. Основные разрезы стратоннов расположены в междуречье руч. Чочим-Боал (бас. р. Дянышка) и руч. Серинджах (бас. р. Эчий). Биостратиграфической основой расчленения и корреляции изученного интервала является ангарская макрофлора в совокупности с комплексами морской раковинной макрофауны [3, 8, 9, 15, 20 и др.]. В изучение в стратотипической местности (рис. 1, левая врезка) были вовлечены коренные выходы серджахской и чочимбальской свит, проведено их деталь-

ГРИНЕНКО Виталий Семенович – к.г.-м.н., с.н.с., grinenkovs@diamond.ysn.ru; ПРОКОПЬЕВ Андрей Владимирович – к.г.-м.н., зам. директора, prokopiev@diamond.ysn.ru.

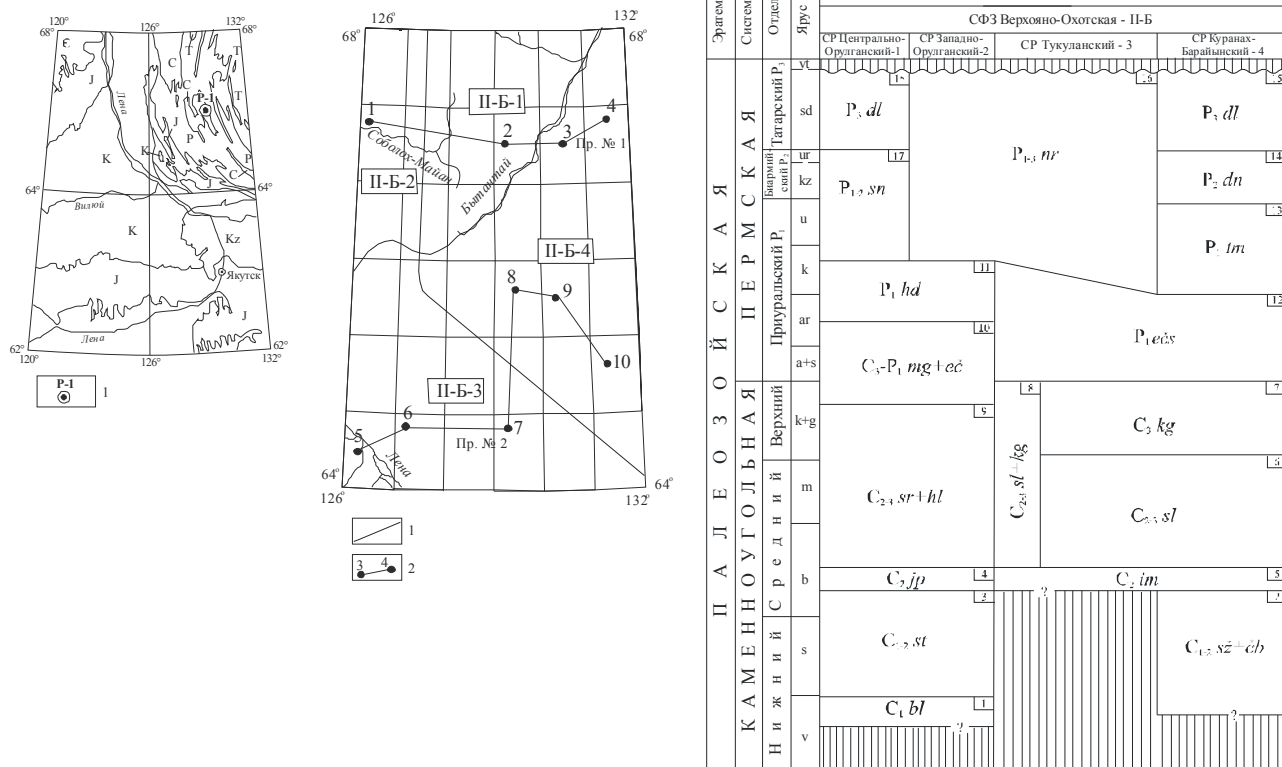


Рис. 1. Местоположение (изученный разрез P-1), см. рис. 2) углеродсодержащих стратон в пределах Куранахского антиклинория (левая врезка): Схема структурно-фациального районирования масштаба 1:5 000 000 (лист Q-52) и Схема корреляции каменноугольных и пермских отложений Верхояно-Охотской структурно-фациальной зоны (Куранахский и Орулганский антиклинории, Западное Верхоянье).

Условные обозначения. Схема структурно-фациального районирования масштаба 1:5 000 000 (центральная врезка): 1 – границы районов; 2 – положение пунктов литофациальных разрезов. При построении разрезов использованы картографические материалы изданных листов Гостгеолкарт-200 (издание первое), рукописных отчетов по ГТС-50 и материалам глубокого бурения: 1 – Сусов М.В. и др. (1984); 2 – Андреев В.С. и др. (1981); 3 – Сибирцев Ю.М. и др. (1972); 4 – Масленников В.В. и др. (1979); 5 – Баташанова Л.В. и др. (1989ф); 6 – Гома А.Н. и др. (1993ф); 7 – Гома А.Н. и др. (1979ф); 8 – Сафонов Ю.В., Гриненко В.С. и др. (1979ф); 9 – Некрасов А.И. и др. (1997ф); 10 – Тютюнников Л.Г. и др. (1997). Аббревиатура элементов районирования. Структурно-фациальная область (СФО): Восточно-Сибирская (II). Структурно-фациальная зона (СФЗ): Верхояно-Охотская (II-Б). Стратиграфические районы (СР): Центрально-Орулганский (II-Б-1), Западно-Орулганский (II-Б-2), Тукуланский (II-Б-3), Куранах-Бараинский (II-Б-4). Схема корреляции каменноугольных и пермских отложений Верхояно-Охотской структурно-фациальной зоны (Куранахский и Орулганский антиклинории, Западное Верхоянье) (правая врезка). Стратиграфические подразделения (свиты, серии) и их индексы: 1 – былыкятская ($C_1 bl$) свита; 2 – сержахская и чочимбалская ($C_{1-2s\bar{z}+cb}$) свиты объединенные; 3 – сетчанская (C_{1-2st}) свита; 4 – юпенчинская ($C_2 jp$) свита; 5 – имтанджинская ($C_2 im$) свита; 6 – солончанская (C_{2-3sl}) свита; 7 – кыгылтасская ($C_3 kg$) свита; 8 – солончанская и кыгылтасская ($C_{2-3sl+kg}$) свиты объединенные; 9 – суорганская и халданская ($C_{2-3sr+hl}$) свиты объединенные; 10 – мегенская и эчийская ($C_3-P_1 mg+ec$) свиты объединенные; 11 – халджинская ($P_1 hd$) свита; 12 – эчийская ($P_1 ec\bar{s}$) серия; 13 – тумаринская ($P_1 tm$) серия; 14 – деленжинская ($P_2 dn$) серия; 15 – дулгалахская ($P_2 dl$) серия; 16 – нёрская (P_{1-3nr}) свита; 17 – сюрнская (P_{1-2sn}) свита

ное поинтервальное (0,0–10,0 м) описание. Выполнен целевой отбор проб пунктирной (1,0 м) бороздой в начале каждого интервала на определение $C_{орг}$ и мелкого (дисперсного) золота (химический и спектрофотометрический анализы) (см. ниже).

Районирование. Изученная территория Куранахского антиклинория располагается в зоне перехода «Сибирская платформа – Верхояно-Колымская складчатая область» и в рамках разработанного структурно-фациального районирования отнесена к Верхояно-Охотской структурно-фациальной зоне (СФЗ) Восточно-Сибир-

ской структурно-фациальной области (СФО) [5]. Верхояно-Охотская СФЗ характеризуется закономерными фациальными рядами отложений, объединяющихся во времени и пространстве единым этапом осадконакопления. В пределах Верхояно-Охотской СФЗ выделены (рис. 1, центральная врезка): Западно-Орулганский, Центрально-Орулганский, Тукуланский и Куранах-Бараинский стратиграфические районы. В обозначенных районах местные подразделения коррелируются между собой благодаря наличию условных зон непосредственной смены литологического состава, палеобиоценозов или та-

фофлор. Увязанные таким образом между собой по латерали стратоны в пределах Верхояно-Охотской СФЗ (рис. 1, центральная врезка) были картографированы в масштабах 1:500 000 и 1:1 000 000 как геологические тела (свиты, серии) с местными географическими названиями [16, 17, 19 и др.].

Литостратиграфия. Складчатые структуры Куранахского антиклинория сложены верхнепалеозойскими толщами [16, 17]. На западном и восточном его крыльях, в зонах сопряжения антиклинория с Предверхоанским краевым прогибом (на западе) и с Сартангским синклинорием (на востоке), развиты мезозойские (триас-юра) отложения. В формировании ВТК на Куранахском антиклинории и в его периферии обычно выделяют два крупных этапа. Первый этап характеризуется геосинклинальным режимом седиментации, второй, начиная с кровли верхней юры, является орогенным. В первом этапе, в верхнем палеозое, выделяют два крупных ритма седиментации регрессивного профиля. Продолжительность первого ритма – с серджакского по верхнекыгылтасское время, второго ритма – с хорокытского (раннеэчийского) времени по хальпирское время (по завершении палеозойской эратемы). Каждый из этих доминирующих ритмов седиментации подразделяется на серию более мелких аналогично построенных ритмов, фации которых формируют местные геологические тела (свиты, серии). Они прослежены в пределах всего Западного Верхоянья. Исключение составляют серджакская и чочимбальская свиты (рис. 1, правая врезка), вскрывающиеся только в пределах Куранахского антиклинория, в своде крупнейшей антиклинали – Кыгылтасской, в зоне резкого и амплитудного воздымания её шарнира [21].

Фациальные обстановки. Как было отмечено выше, серджакская свита является наиболее древним стратоном в Куранахском антиклинории. В эрозионном срезе вскрыта только своей верхней (верхи визейского яруса) регрессивной песчаниковой (видимая мощность до 250 м) частью в ядре Кыгылтасской антиклинали [16]. В её составе отмечены мощные массивные разнотернистые песчаники в чередовании с редкими маломощными (первые метры) пластами мелко- и крупнотернистых алевролитов. В песчаных породах присутствует довольно значительное количество сингенетического пирита, характеризующего интенсивное сероводородное заражение во внутреннем шельфе бассейна седиментации. Данный факт исключает развитие какого-либо многообразия видов морской раковинной фауны. В разрезе, в глинистых фациях свиты фиксируется лишь присутствие редких предста-

вителей двустворчатых моллюсков *Wilkigia* cf. *regularis* (King) (устное сообщение А.С. Бякова), которые характеризуют, в целом, морские мелководные обстановки осадконакопления.

В чочимбальское время морская акватория внутреннего шельфа большей частью была относительно глубоководной. Среди осадков (нижняя часть чочимбальской свиты) преобладают глинисто-алевритовые (аргиллиты, алевролиты черные разнотернистые, прослои песчаников мелкозернистых) с параллельной в низах слоёв и с горизонтальной, мелкой волнистой и косоволнистой слоистостью в верхах. В верхней части разреза свиты среди алевролитов также отмечаются прослои песчаников серых разнотернистых с линзами гравелитов и маломощных (первые см) конгломератов. Общая мощность свиты – 850–950 м. Нахождение в них большого количества сингенетического пирита указывает на сероводородное заражение придонной части бассейна. Фауна в нижней части свиты встречается исключительно редко и, скорее всего, её появление маркирует периоды кратковременного обмеления бассейна, в котором, вероятнее всего, устанавливался нормальный его солевой режим, вследствие чего, в отлагающихся маломощных глинисто-песчаных осадках, чаще в кровле слоев, захоронялась фауна брахиопод.

В конце чочимбальского времени глубоководные обстановки сменяются мелководными и прибрежно-морскими, в которых накапливались песчано-глинистые осадки с крупной косой и волнистой слоистостью. Нормальный солевой и газовый режим акватории внутреннего шельфа морского палеобассейна подтверждается появлением брахиопод *Verkhotomia* aff. *tukulaensis* (Kasch.), *Verchojanina* sp., *Euphemites romanovsky* Netsh., а частые следы жизнедеятельности организмов (с обширной биотурбацией глинистых пород) батиметрически классифицируют относительно глубоководный характер их формирования.

Структуры разрезов, ритмы которых, подобные серджакской и чочимбальской свитам, установлены и в Орулганском антиклинории (рис. 1, правая врезка), где им условно, по положению в разрезе, отвечают (соответственно) типы разрезов ниже- и ниже-среднекарбонных былыкатской (1200–1700 м) и сетачанской (1000–1300 м) свит [16, 17]. Разнотернистые песчано-глинистые фации былыкатской свиты большей частью характеризуют преимущественно континентальные обстановки осадконакопления с обильно развитой в этот период флорой *Lepidodendropsis consinna* Radcz., *Tomi-odendron persikovii* Schwed., *T. ostrogianum* (Zal.), *Angarodendron tetragonum* (Chachl.), *Aba-*

canidium ex gr. *abacanum* (Zal.) Radcz., *Angaropteridium cardiopteroides* (Schm.) Zal., *Samaropsis* aff. *auriculata* Such. В вышезалегающих глинистых и глинисто-песчаных породах сетчанской свиты уже присутствуют как фауна *Anthraco-nauta fomitschevi* Fed. (нижняя часть свиты), так и флора *Angarodendron obrutschewii* Zal., *Angaropteridium cardiopteroides* (Schmalh.) Zal., *A. cf. tyrganicum* Zal. (верхняя часть свиты), что указывает на смену собственно морских или прибрежно-морских условий седиментации на лагунные и континентальные.

Металлоносность осадочных образований.

Благороднометалльно-полиметаллические рудопроявления и месторождения осевой зоны Куранахского антиклинория локализованы в ритмичных аргиллит-алевролитовых и песчаниковых толщах карбона ВТК. В пределах месторождений установлены золото-кварцевая мало-сульфидная и золото-полиметаллическая полиформационная рудные формации. Иногда, вследствие дифференциации оруденения в пределах отдельных месторождений, золото-полиметаллическая полиформационная формация исследователями не диагностируется, а выделяются две самостоятельных рудных формации: золото-серебро-полисульфидная и серебро-полисульфидная. Как правило, оруденение, контролируемое осадочными терригенными породами, приурочивается к надынтрузивным зонам небольших по площади выходов на поверхность (или погребенных, скрытых на глубине и обозначенных только по геолого-геофизическим данным) интрузий, представлено, преимущественно, серией жильно-прожилковых зон с формированием рудоносных стратифицированных серий [22], возрастные рубежи которых определяют их минерагеническую специфику: золото ($C_{1v}-C_{2b}$) и серебро ($C_{2b}-C_{3k+g}$). Нахождение в прожилковых зонах самородного золота или сульфосолей серебра с галенитом и сфалеритом является обычным в обозначенных месторождениях Куранахского антиклинория. Однако, в рудах обособленных месторождений и рудопроявлений основной экономической доминантой полезного компонента обычно служат либо серебро и полиметаллы, либо золото и серебро, либо золото и полиметаллы. Такая особенность регенерации оруденения свойственна глубинным флюидно-магматическим системам, которые, как правило, формируются над обособленными структурами фундамента, охватывая в своём функционировании вверх по разрезу осадочные комплексы вмещающей рамы. В Западном Верхоянье такой рудоконтролирующей структурой, возможно, является Эчийский гранитогнейсовый купол, маркированный Эчий-

ским гравитационным минимумом силы тяжести [23–25]. С эволюцией Эчийского гранито-гнейсового купола неразрывно связано формирование и развитие Хобойоту-Эчийского массива гранитоидов [26].

Как известно, заложение крупнейшего на востоке Азии Верхояно-Охотского миегеосинклинального палеобассейна на дорифейском кратонном основании отвечает раннекаменноугольному (C_{1t-v}) этапу. Поздневизейское время и последующие рубежи геохронологической эволюции этого этапа в ВТК Куранахского антиклинория маркируются стратифицированными рудоносными сериями [22]. Высокоуглеродистые ($C_{орг}=1,2-1,5\%$, $\max C_{орг}=4,46\%$) черные пиритизированные алевролиты и аргиллиты формируют староручьёвскую серию, специализированную на золото ($0,15-0,5$ г/т, таблица), а перекрывающая её стратифицированная рудоносная антовчанская серия (серые зернистые песчаники и алевролиты) характеризуется повышенными содержаниями серебра. Обоим сериям по площади своего развития ($400-450$ км $\times$ $50-80$ км, вертикальная мощность заполнения до 1500 м) сопутствует вкрапленная и рассеянная минерализация Cu, Pb, Zn, Mo, Bi. Столь разнообразный состав рудоносного заполнения объясняется тем, что в кристаллическом фундаменте (по геолого-геофизическим данным) прослеживается в одном с антиклинорием простираении раннепротерозойский Билякчанско-Омолыйский вулканоплутонический пояс, специализированный на благородные, цветные и редкие металлы [27]. Последний является погребенным меридиональным продолжением Билякчанского докембрийского грабена, отделяющего архейский цоколь Алданского щита от такового Охотского массива, и который в Верхоянье прослежен на расстоянии более 1500 км по характерному полосовому минимуму силы тяжести.

Перспективным для поисков промышленных месторождений благородных металлов является отрезок Куранахского антиклинория, маркированный Хобойоту-Эчийским и Кысылтасским массивами реоморфических (телескопированных совместно с гранитогнейсами из кристаллического фундамента) гранитоидов. Фазы центрального сводово-купольного разрастания Эчийского гранитогнейсового купола имели место в раннем протерозое (PR_1), среднем палеозое (D_{2-3}), среднем-позднем мезозое – кайнозое (J_3-K_1-KZ). В позднем мезозое они сопровождались импульсами приповерхностного магматизма, синхронными гомо- и антидромному циклитам кольцевой структуры хр. Сарычева (бас. р. Индигирка). Этот вывод сделан на осно-

УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИЕ СТРАТОНЫ ВЕРХНЕГО ПАЛЕОЗОЯ КУРАНАХСКОГО АНТИКЛИНОРИЯ

Результаты химического и спектрофотометрического анализов проб верхоянского терригенного комплекса (серджахская и чочимбальская свиты Куранахского антиклинория, Западное Верхоянье)

Проба	Свита	Бассейн	Порода	С _{орг} , %	СПЗМ, г/т	Проба	Свита	Бассейн	Порода	С _{орг} , %	СПЗМ, г/т
18-541	C ₁₅ ž	Чочим-Боал	Песчаник	0,02		18-588	C ₂ čb	Чочим-Боал	Песчаник	0,02	
18-542	- // -	- // -	Песчаник	0,56		18-589	- // -	- // -	Алевролит	0,74	
18-543	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-590	- // -	- // -	Алевролит	0,02	
18-544	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-591	- // -	- // -	Алевролит	0,02	
18-545	- // -	- // -	Песчаник	0,06		18-592	- // -	- // -	Алевролит	0,68	1,0
18-546	- // -	- // -	Песчаник	0,02	0,6	18-593	- // -	- // -	Алевролит	0,24	0,5
18-547	- // -	- // -	Песчаник	0,02	0,5	18-594	- // -	- // -	Алевролит	0,34	
18-548	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-595	- // -	- // -	Алевролит	0,02	0,5
18-549	- // -	- // -	Песчаник	0,1		18-596	- // -	- // -	Алевролит	0,02	0,7
18-550	- // -	- // -	Песчаник	0,05		18-597	- // -	- // -	Алевролит	0,02	
18-551	- // -	- // -	Песчаник	0,06		18-598	- // -	- // -	Песчаник	0,02	
18-552	- // -	- // -	Песчаник	0,03	0,7	18-599	- // -	- // -	Алевролит	0,02	0,5
18-553	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-600	- // -	- // -	Песчаник	0,52	
18-554	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-601	- // -	- // -	Песчаник	0,02	
18-555	- // -	- // -	Песчаник	0,02		18-602	- // -	- // -	Песчаник	0,12	
18-556	- // -	- // -	Песчаник	0,12		18-603	- // -	- // -	Алевролит	0,14	
18-557	- // -	- // -	Алевролит	1,12		18-604	- // -	- // -	Алевролит	0,02	
18-558	C ₂ čb	- // -	Алевролит	1,2	1,0	18-605	- // -	- // -	Алевролит	0,06	
18-559	- // -	- // -	Алевролит	0,54	0,5	18-606	- // -	- // -	Алевролит	0,03	
18-560	- // -	- // -	Алевролит	0,53		18-607	- // -	- // -	Алевролит	0,04	
18-561	- // -	- // -	Алевролит	0,16		18-608	- // -	- // -	Алевролит	0,08	
18-562	- // -	- // -	Алевролит	1,08		18-609	- // -	- // -	Алевролит	0,06	
18-563	- // -	- // -	Алевролит	0,44		Сборы по площади					
18-564	- // -	- // -	Алевролит	0,26		271511	- // -	- // -	Алевролит	1,26	
18-565	- // -	- // -	Алевролит	0,14	0,5	271512	- // -	- // -	Алевролит	1,02	
18-566	- // -	- // -	Алевролит	0,54		27245	- // -	- // -	Алевролит	1,26	
18-567	- // -	- // -	Алевролит	0,2		27246	- // -	- // -	Алевролит	0,82	
18-568	- // -	- // -	Алевролит	0,08		27247	- // -	- // -	Алевролит	0,95	
18-569	- // -	- // -	Алевролит	0,26		2743	- // -	Чуора	Алевролит	0,66	
18-570	- // -	- // -	Алевролит	0,32	0,5	27436	- // -	- // -	Алевролит	0,88	
18-571	- // -	- // -	Алевролит	0,18		27439	- // -	- // -	Песчаник	0,64	
18-574	- // -	- // -	Алевролит	0,02		274311	- // -	- // -	Алевролит	4,34	
18-575	- // -	- // -	Алевролит	0,1		274314	- // -	- // -	Алевролит	1,3	
18-576	- // -	- // -	Алевролит	0,72		274315	- // -	- // -	Алевролит	4,46	
18-577	- // -	- // -	Алевролит	1,12	0,5	274316	- // -	- // -	Алевролит	2,46	
18-578	- // -	- // -	Алевролит	0,58		274319	- // -	- // -	Песчаник	0,6	
18-579	- // -	- // -	Алевролит	0,33		274321	- // -	- // -	Алевролит	1,22	
18-580	- // -	- // -	Алевролит	0,08		2744	- // -	- // -	Алевролит	1,62	
18-581	- // -	- // -	Алевролит	0,43		Нижние пределы анализов С _{орг} – 0,02%					
18-582	- // -	- // -	Алевролит	0,54							
18-583	- // -	- // -	Алевролит	0,46							
18-584	- // -	- // -	Алевролит	0,34							
18-585	- // -	- // -	Песчаник	0,02							
18-586	- // -	- // -	Песчаник	0,02							
18-587	- // -	- // -	Песчаник	0,02							

вании анализа датировок абсолютного возраста магматитов Хобойоту-Эчийского массива реоморфических гранитоидов калий-аргоновым методом, образующих непрерывный ряд от гранодиоритов до гранит-порфиров. Фазы гравитационного обрушения и проседания проявились в позднем палеозое (C₁₋₃), раннем мезозое (T₃-J₁), среднем-позднем мезозое – кайнозое (J₃-K₁-KZ). В пользу такого вывода свидетельствуют

результаты детального литогеохимического анализа базальных горизонтов ВТК Куранахского антиклинория (серджахская и чочимбальская свиты). Из характеристики рисунка и содержания таблицы (рис. 2, таблица) следует, что повышенные концентрации золота в глинистых литифицированных осадках ВТК имеют устойчивую положительную корреляцию с содержаниями свободного органического вещества мор-

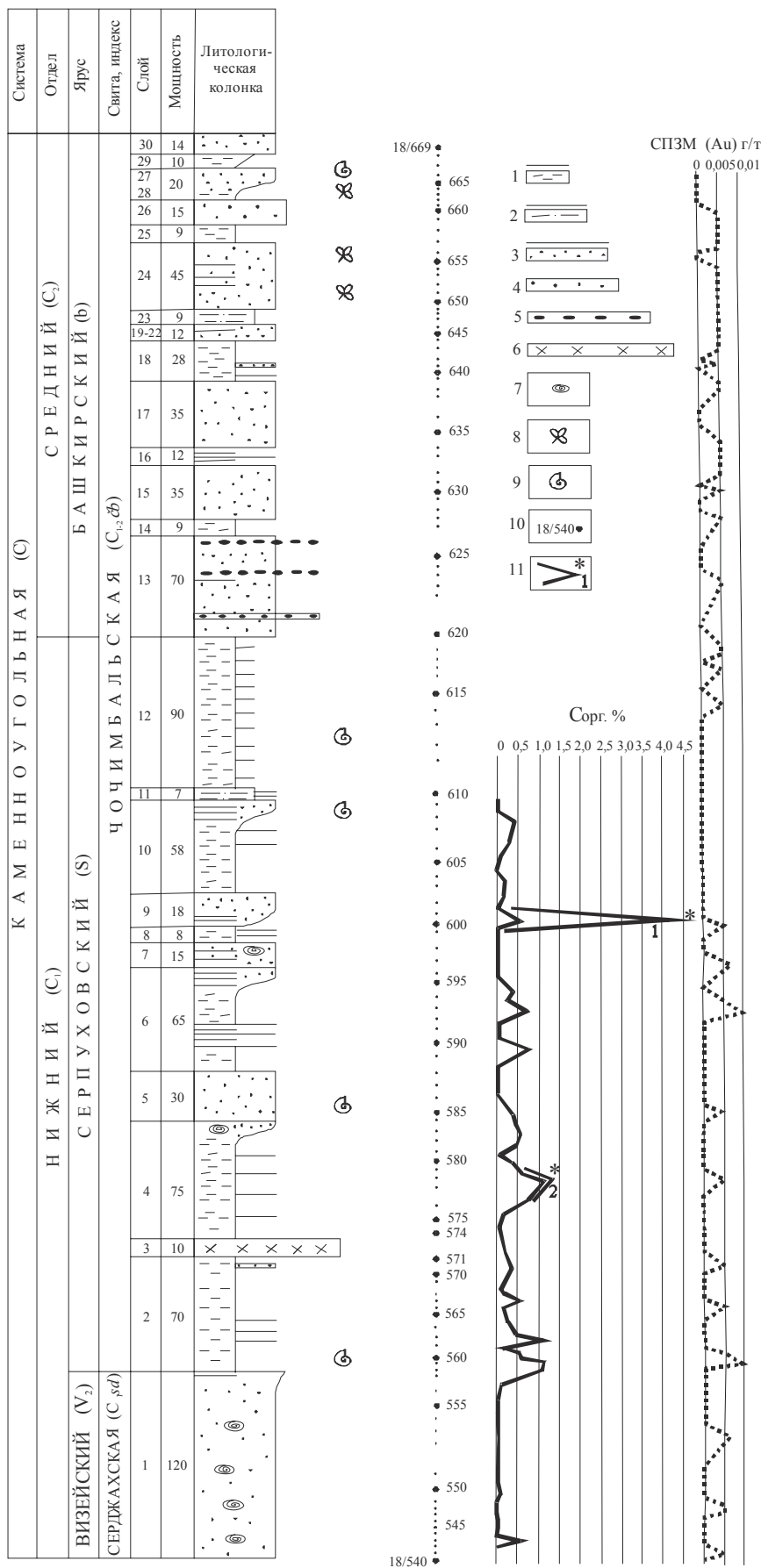


Рис. 2. Литологическая колонка и геохимическая (Сорг, %; спектрозолотометрия, г/т) характеристика базальных горизонтов верхоянского терригенного комплекса (серджахская и чочимбальская свиты Куранахского антиклинария, Западное Верхоянье): 1 – алевролиты мелкозернистые; 2 – алевролиты крупнозернистые; 3 – песчаники мелкозернистые; 4 – песчаники среднезернистые; 5 – внутриформационные конгломераты; 6 – субпластовая дайка гранодиоритов; 7 – подводно-оползневые образования; 8 – флора; 9 – фауна; 10 – пункты отбора проб (в числителе номер точки, в знаменателе номер пробы); 11 – максимальные значения Сорг.: точка 1 – устьевая часть р. Чуора, антиклинальная складка (4,46%); точка 2 – бассейн руч. Чочим-Боал (1,26%).
Примечание. Химический анализ выполнен в ЦАЛ ФГУП «ВСЕГЕИ»; спектральный золотометрический анализ – в ЦЛ ГУГТП РС «Якутскгеология»

ского генезиса. Следует также учитывать, что эрозией не вскрыты базальные горизонты ВТК, которые на глубине непосредственно залегают на кристаллических породах Эчийского гранитогнейсового купола (по [22–25]). Поэтому можно допускать, что при высокотемпературном метаморфизме в глубокозалегающие горизонты потенциально черносланцевых толщ (серджахская свита) золота выносилось, по меньшей мере, в 2–3 раза больше, чем его сконцентрировано в надынтрузивном субстрате осадочных образований или в рудных жильно-прожилковых зонах штокверкового типа, расположенных в пределах вскрытых (и не вскрытых) эрозией интрузий. Эти зоны уже сейчас обозначены или прогнозируются как крупнотоннажные месторождения благородных металлов.

Выводы. I. В Куранахском антиклинории установлены потенциально углеродистые

(черносланцевые) отложения в базальных горизонтах ВТК. Выявлены коррелируемые уровни повышенной концентрации S_{org} и благороднометальной металлоносности, приуроченные к трансгрессивным циклитам нижнего-среднего карбона. Углеродистые отложения характеризуются присутствием высоких концентраций сингенетического пирита и наложенной сульфидизации вкрапленного или прожилково-вкрапленного типа с повышенной золотоносностью. Результаты исследований позволяют относить потенциально углеродистые (черносланцевые) фации карбона к перспективным на формирование крупнотоннажных объектов с золото-(мышьяково)-сульфидным типом вкрапленного и прожилково-вкрапленного оруденения.

II. Объективным обстоятельством, препятствующим увязке факторов (критериев) прогноза благороднометального оруденения различных районов Западного Верхоянья в единую поисковую систему, является отсутствие региональной глубинной структурно-тектонической основы масштаба 1:500 000 и детальнее. Опыт регионального изучения особенностей стратиформного благороднометального оруденения ряда черносланцевых провинций Сибири (Приенисейской, Мамско-Бодайбинской, Кадаро-Удоканской) показал, что возникшая проблема может быть решена в сжатые сроки и с минимальными финансовыми затратами если для прослеживания регионально сульфидизированных продуктивных горизонтов будет использован метод глубинного магнитотеллурического зондирования. Поэтому в Западном Верхоянье рекомендуется постановка съемки ГМТЗ масштаба 1:1 000 000 со станциями длительного многосуточного наблюдения прохождения возмущающего импульса по методике ВостСНИИГТимСа на эталонном участке (площадь Эчийского гранитоидного купола, маркированная Хобойоту-Эчийским и Кысылтасским массивами реоморфических гранитоидов). Основной целью постановки данного вида исследований явилось бы оконтуривание площадей (или зон) проявления как базовых – золото-кварцевой мало-сульфидной и золото-полиметаллической полиформационной рудных формаций, формирующих в данном районе Куранахского антиклинория месторождения с благороднометальной минерализацией, так и золото-серебро-мышьяково-сульфидной формации, образующей комплексные (крупнотоннажные) месторождения с бедными вкрапленными рудами, индикатором в которых выступают концентрации рассеянных тонкодисперсных благородных металлов в потенциально черносланцевых толщах.

Литература

1. Будников И.В., Гриненко В.С., Клец А.Г. Верхоянский складчатый пояс – ключевой регион для решения основных проблем стратиграфии верхнего палеозоя Сибири // Отечественная геология. – 1994. – № 8. – С. 42–46.
2. Будников И.В., Гриненко В.С., Клец А.Г. и др. Модель формирования верхнепалеозойских отложений востока Сибирской платформы и её складчатого обрамления (закономерности осадконакопления, районирование, корреляция) // Отечественная геология. – 2003. – № 6. – С. 86–92.
3. Budnikov I.V., Klets A.G., Grinenko V.S., Kutygin R.V. Carboniferous of East Yakutia // Newsletter on Carboniferous stratigraphy. – 1996. – Number 14. – P.12–14.
4. Гриненко В.С., Будников И.В., Клец А.Г. Олистостромы в пермском разрезе центральной части Верхоянского складчатого пояса // Отечественная геология. – 1997. – № 2. – С. 36–45.
5. Гриненко В.С., Трущелев А.М. Новые данные о стратиграфии и районировании каменноугольных и пермских отложений алмазоносных районов северо-востока Сибирской платформы // Отечественная геология. – 2011. – № 1. – С. 88–100.
6. Гриненко В.С., Девятков В.П., Ротман А.Я. и др. Верхний палеозой погребенных геодепрессий внутренних районов востока Сибирской платформы // Наука и образование. – 2013. – № 2 (70). – С. 14–20.
7. Клец А.Г., Будников И.В., Кутыгин Р.В., Гриненко В.С. Опорный разрез пограничных отложений нижней и верхней перми Верхоянья и его корреляции // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2001. – Т. 9, № 3. – С. 41–57.
8. Клец А.Г., Будников И.В., Кутыгин Р.В., Гриненко В.С. Событийные уровни в среднем карбон-ранней перми Верхоянья и региональная стратиграфическая схема // Тихоокеанская геология. – 2001. – Т. 20, № 5. – С. 45–57.
9. Klets A.G., Budnikov I.V., Kutygin R.V. et al. The Permian of the Verkhoyansk–Okhotsk region, NE Russia // Journal of Asia Earth Sciences. Volume 26. University of Houston USA, 2006. – P. 258–268.
10. Мишин В.М., Гриненко В.С. Каменноугольные отложения Алданской антеклизы – ключевое звено системы «протоколлектор–коренной источник алмаза» // Наука и образование. – 2006. – № 4 (44). – С. 14–19.
11. Мишин В.М., Гриненко В.С. Новые представления о реликтах каменноугольных отложений бассейна р. Амга – новый пролонгирующий фактор методики поисков коренных месторождений алмаза на закрытых территориях (Центральная Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. – 2006. – № 1. – С. 108–113.
12. Budnikov I.V., Grinenko V.S., Klets A.G. The Verkhoyansk foldbelt as a key region for solving problems of the Upper Paleozoic stratigraphy in Siberia // Otechestvennaya geologiya. – 1994. – Number 8. – P. 42–46.

13. Klets A.G., Budnikov I.V., Kurygin R.V., Grinenko V.S. The referens section of the Lower–Upper Permian boundary beds in the Verkhoyansk region and its correlation // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2001. – Vol. 9. – Number 3. – P. 247–262.

14. Klets A.G., Budnikov I.V., Kutygin R.V., Grinenko V.S. Permian stratigraphic Units of the Western Verkhoyansk Mountains and Their Correlation // *Permian*. June 1998. – Number 30. – P. 8.

15. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Клец А.Г. и др. Опорный разрез дулгалахского и хальпирского горизонтов (татарский ярус) Западного Верхоянья // *Тихоокеанская геология*. – 2003. – № 6. – С. 82–97.

16. Гриненко В.С. Каменноугольная система // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008. – С. 9–26.

17. Гриненко В.С. Пермская система // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008. – С. 26–35.

18. Соболев Е.С., Будников И.В., Клец А.Г., Гриненко В.С. Позднебахкирские аммоноидеи и наутилоидеи Западного Верхоянья // *Палеонтологический журнал*. – 1998. – № 5. – С.13–25.

19. Ян-Жин-Шин В.А., Урзов А.С., Гриненко В.С. и др. Новый этап картографирования территории Якутии // *Отечественная геология*. – 1994. – №8. – С. 25–27.

20. Sobolev E.S., Klets A.G., Grinenko V.S., Budnikov I.V. Late Bachkirian ammonoids and nautiloids from the Western Verkhoyansk region // *Paleontological Journal*. – 1998. – Vol. 32, Number 5. – P. 447–460.

21. Прокопьев А.В. Тектоника // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист

Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008а. – С. 139–165.

22. Гриненко В.С., Мишин В.М. Эчийский рудный район Западного Верхоянья (телескопированный характер, промышленные масштабы и суперпозиция оруденения // *Рудогенез и металлогения Востока Азии: материалы совещания, посвященного 100-летию д.г.-м.н., лауреата Государственной премии Б.Л. Флерова*. – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2006. – С. 51–54.

23. Гриненко В.С., Стогний Г.А. О глубинном строении Куранахского антиклинория (Западное Верхоянье) // *Надвиги и шарьяжи платформенных и складчатых областей Сибири и Дальнего Востока и их металлогеническое значение*. – Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 1992. – С. 99–101.

24. Grinenko V.S., Stogny G.A. Tectonic layering of the Central Verkhoyansk Foldbelt (East Siberia) // *30-th International Geological Congress. Vol. 2 of 3. Beijing, China, 1996*. – P. 339.

25. Гриненко В.С., Стогний Г.А. Эчийский гранито-гнейсовый купол – рудоконтролирующая структура Западного Верхоянья // *Геофизические исследования при разведке недр и экологических исследованиях: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. Вып. 2*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – С. 205–207.

26. Гриненко В.С., Стогний Г.А. Роль фактора ремобилизации докембрийского субстрата в формировании рудоносных объектов Западного Верхоянья (Восточная Якутия) // *Вестник Госкомгеологии: материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия)*. – Якутск: Якутское издательство СО РАН, 2004. – № 1(6). – С. 50–57.

27. Хренов П.М. Негеосинклинальные вулканоплутонические пояса континентального массива Восточной Сибири. – М.: Наука, 1981. – 221 с.

Поступила в редакцию 11.12.2014

УДК 553.981:551.762 (571.56–15)

К проблеме релаксации юрской залежи Мастахского ГКМ

В.Б. Черненко, А.И. Сивцев *

ОАО «Сахатранснефтегаз», г. Якутск

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

Проводится анализ разработки юрской залежи Мастахского газоконденсатного месторождения, находящегося в Хапчагайском мегавале Вилюйской синеклизы. Коэффициент газоотдачи после прекращения разработки залежи J₁-I составил 34% от запасов газа, утвержденных в ГКЗ СССР. Сделан вывод, что низкий коэффициент газоотдачи обусловлен неравномерными и интенсивными отборами

ЧЕРНЕНКО Вадим Борисович – зам. начальника, cherne.vadim@yandex.ru; *СИВЦЕВ Алексей Иванович – к.г.-м.н., с.н.с., maraday@yandex.ru.

13. Klets A.G., Budnikov I.V., Kutygin R.V., Grinenko V.S. The referens section of the Lower–Upper Permian boundary beds in the Verkhoyansk region and its correlation // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2001. – Vol. 9. – Number 3. – P. 247–262.

14. Klets A.G., Budnikov I.V., Kutygin R.V., Grinenko V.S. Permian stratigraphic Units of the Western Verkhoyansk Mountains and Their Correlation // *Permian*. June 1998. – Number 30. – P. 8.

15. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Клец А.Г. и др. Опорный разрез дулгалахского и хальпирского горизонтов (татарский ярус) Западного Верхоянья // *Тихоокеанская геология*. – 2003. – № 6. – С. 82–97.

16. Гриненко В.С. Каменноугольная система // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008. – С. 9–26.

17. Гриненко В.С. Пермская система // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008. – С. 26–35.

18. Соболев Е.С., Будников И.В., Клец А.Г., Гриненко В.С. Позднебахкирские аммоноидеи и наутилоидеи Западного Верхоянья // *Палеонтологический журнал*. – 1998. – № 5. – С.13–25.

19. Ян-Жин-Шин В.А., Урзов А.С., Гриненко В.С. и др. Новый этап картографирования территории Якутии // *Отечественная геология*. – 1994. – №8. – С. 25–27.

20. Sobolev E.S., Klets A.G., Grinenko V.S., Budnikov I.V. Late Bachkirian ammonoids and nautiloids from the Western Verkhoyansk region // *Paleontological Journal*. – 1998. – Vol. 32, Number 5. – P. 447–460.

21. Прокопьев А.В. Тектоника // Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист

Q–52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картфабрики ВСЕГЕИ, 2008а. – С. 139–165.

22. Гриненко В.С., Мишин В.М. Эчийский рудный район Западного Верхоянья (телескопированный характер, промышленные масштабы и суперпозиция оруденения // *Рудогенез и металлогения Востока Азии: материалы совещания, посвященного 100-летию д.г.-м.н., лауреата Государственной премии Б.Л. Флерова*. – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2006. – С. 51–54.

23. Гриненко В.С., Стогний Г.А. О глубинном строении Куранахского антиклинория (Западное Верхоянье) // *Надвиги и шарьяжи платформенных и складчатых областей Сибири и Дальнего Востока и их металлогеническое значение*. – Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 1992. – С. 99–101.

24. Grinenko V.S., Stogny G.A. Tectonic layering of the Central Verkhoyansk Foldbelt (East Siberia) // *30-th International Geological Congress. Vol. 2 of 3. Beijing, China, 1996*. – P. 339.

25. Гриненко В.С., Стогний Г.А. Эчийский гранито-гнейсовый купол – рудоконтролирующая структура Западного Верхоянья // *Геофизические исследования при разведке недр и экологических исследованиях: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. Вып. 2*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – С. 205–207.

26. Гриненко В.С., Стогний Г.А. Роль фактора ремобилизации докембрийского субстрата в формировании рудоносных объектов Западного Верхоянья (Восточная Якутия) // *Вестник Госкомгеологии: материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия)*. – Якутск: Якутское издательство СО РАН, 2004. – № 1(6). – С. 50–57.

27. Хренов П.М. Негеосинклинальные вулканоплутонические пояса континентального массива Восточной Сибири. – М.: Наука, 1981. – 221 с.

Поступила в редакцию 11.12.2014

УДК 553.981:551.762 (571.56–15)

К проблеме релаксации юрской залежи Мастахского ГКМ

В.Б. Черненко, А.И. Сивцев *

ОАО «Сахатранснефтегаз», г. Якутск

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

Проводится анализ разработки юрской залежи Мастахского газоконденсатного месторождения, находящегося в Хапчагайском мегавале Вилюйской синеклизы. Коэффициент газоотдачи после прекращения разработки залежи J₁-I составил 34% от запасов газа, утвержденных в ГКЗ СССР. Сделан вывод, что низкий коэффициент газоотдачи обусловлен неравномерными и интенсивными отборами

ЧЕРНЕНКО Вадим Борисович – зам. начальника, cherne.vadim@yandex.ru; *СИВЦЕВ Алексей Иванович – к.г.-м.н., с.н.с., maraday@yandex.ru.

газа из залежи, которые привели к подтягиванию конусов воды к эксплуатационным скважинам и их преждевременному обводнению. Приведены единичные результаты замеров пластового давления по наблюдательным скважинам с 2003 по 2013 г. Установлена ощутимая динамика релаксации пластового давления (до 0,12 МПа в год). Рассмотрены различные причины наблюдаемого восстановления пластового давления. В качестве наиболее вероятных причин рассматриваются перераспределение заземленных объемов газа, техногенные перетоки и дегазация подошвенных вод. Рекомендовано проведение газоконденсатных исследований в залежи с целью выявления изменения состава газа для зафиксирования возможных межпластовых перетоков газа. Приведена динамика пластовой температуры, которая также имеет тенденцию к ощутимому увеличению (до 4°С). Отмечена необходимость внесения корректив в режимы разработки газоконденсатных месторождений Хапчагайского мегавала.

Ключевые слова: залежь, анализ разработки, пластовые давления, заземленные объемы газа, техногенные перетоки, дегазация.

An analysis of the development of the Jurassic deposit of Mastakh gas-condensate field of the Hapchagay megalithic bank of the Viluy syncline is done. The gas recovery factor after the termination of development of the reservoir J1-I amounted 34% of the gas resources approved in the State Reserves Committee of the USSR. It is concluded that the low recovery factor is brought about by uneven and intensive selection of gas from the reservoir which led to drawing cones of water to the production wells and their premature watering. Some isolated results of measurements of the reservoir pressure from observation wells for the period since 2003 to 2013 year are given. It is established a measurable dynamics of the formation pressure relaxation (up to 0.12 MPa/year). A variety of different reasons of the observed recovery of formation pressure are discussed. As the most probable reasons a redistribution of trapped gas volumes, technogenic cross-flows and degassing of bottom waters are considered. It is recommended to undertake a study of the gas-condensate deposit in order to reveal a gas composition change for fixing probable gas cross-flows between beds. The dynamics of formation temperature is given, that also have a trend to appreciable increase (up to 4°C). The necessity of making corrections in the regimes of development of the gas-condensate fields of Hapchagaysky megawell is marked.

Key words: deposit, analysis of the development, reservoir pressure, trapped gas volumes, technogenic cross-flows, degassing.

Мастахское газоконденсатное месторождение (ГКМ) до 1986 г. являлось базовым объектом в снабжении сырьем энергетического узла центральной части Якутии, включая г. Якутск. В последнее время (1995–2012 гг.) Мастахское ГКМ эксплуатировалось только тремя скважинами по горизонтам Т₁-IVб и Р₂-I для нивелирования пиковых объемов добычи из Средневилюйского ГКМ в зимнее время.

Месторождение расположено в центральной части Хапчагайского мегавала Вилюйской синеклизы Сибирской платформы. Структура имеет субширотное простирание и относится к восточной части Средневилюйско-Мастахского вала. Размеры Мастахской структуры – 41×14 км с амплитудой 270–300 м. Структура в целом характеризуется совпадением структурных планов по всем основным продуктивным горизонтам [1].

Промышленные залежи газа приурочены к мезозойским и верхнепермским отложениям, где выявлено и в разной степени разведано 9 промышленных залежей. Из них в промышленную эксплуатацию были введены 5 залежей: Р₂-I, Т₁-IVа, Т₁-X (восток), Т₁-X (запад) и J₁-I. Основной по запасам и соответственно основным объектом разработки являлась залежь J₁-I.

Впервые запасы газа по нижнеюрской залежи в объеме 20165 млн.м³ по категории С₁ и 2962 млн.м³ по категории С₂ были поставлены на государственный баланс в 1971 г. В 1973 г. на основании проектного документа «Проект опытно-промышленной эксплуатации» ВНИПИГаздобыча введена в промышленную эксплуатацию юрская газовая залежь в пределах опущенного блока западного и восточных куполов. Модель залежи была принята единой, пластовой водоплавающей. Продуктивный горизонт условно разделен на три пласта, сверху вниз: J₁-I₁, J₁-I₂, J₁-II. Характерной особенностью продуктивного горизонта J₁-I является улучшение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) сверху – вниз (средняя пористость J₁-I₁ – 0,182, J₁-I₂ – 0,212, J₁-II – 0,231). Начальное пластовое давление юрской залежи 17,55 МПа, температура – 41°С. Отметка газовойодяного контакта была принята на абсолютном уровне –1681,5 м.

Максимальный действующий фонд эксплуатационных скважин был достигнут в 1980–1984 гг. и составлял 15 единиц. Максимальный фонд скважин из 5 единиц достигнут в 1980 г. на западном куполе и из 11 единиц в 1984 г. на восточном. В последующие годы действующий

фонд снижался по причине обводнения скважин. Залежь эксплуатировалась при водонапорном режиме. Средний дебит скважин в начале эксплуатации составлял 386 тыс.м³/сут, к концу снизился до 130 тыс.м³/сут. Максимальный уровень добычи газа был достигнут в 1980 г. и составил 658,5 млн.м³ газа в год. По мере выработки запасов пластовое давление снизилось на 42% и достигло 10,3 МПа.

Разработка залежи прекращена в 1994 г. на восточном куполе и 1995 г. на западном вследствие обводнения скважин. Всего по залежи отобрано 6911 млн. м³ газа, включая потери 134 млн. м³, что составляет 34% от утвержденных ГКЗ СССР запасов. Надо заметить, начальные запасы Мастахского месторождения пересматривались много раз, в том числе и по залежи продуктивного горизонта J₁-I. Изменение оценки начальных запасов газа по залежам приведено в табл. 1 [2].

Разработка юрской залежи производилась 22 скважинами, вводимыми в разработку одновременно. Бурение и ввод скважин в эксплуатацию продолжались до 1986 г. Основные показатели разработки представлены на рис. 1–2.

На рис. 2 зависимость $p(t)/z[p(t)]$ от $Q_{\text{нак}}$ для расчетного газового дана для начального запаса в объеме 10850 млн.м³ и описывается уравнением регрессии пластового давления $y = -0,002 \times x + 21,325$. Кривая фактического падения пластового давления имеет прямолинейный характер и свидетельствует о более существенном объеме дренирования пластового газа, нежели принятый запас по методу падения давления. Уравнение регрессии фактического пластового давления при линейном тренде имеет вид $y = -0,0011 \times 21,139$ с коэффициентом достоверности 0,9903. Согласно этому уравнению, кривая фактического падения давления пересечет ось абсциссы на отметке 19386 млн.м³. Другими словами, запасы газа по нижнеюрской залежи, принятые в объеме 20165 млн.м³, вполне укладываются в темпы фактического падения пластового давления, если бы залежь J₁-I работала в газовом режиме.

Как показывают фактические данные по разработке, отбор газа из пласта производился крайне неравномерно. Об этом свидетельствуют нижеследующие факты. Самое высокое пластовое давление было замерено в 1973 г. на восточном куполе в скв. 26 – 17,67 МПа.

К концу эксплуатации скважины оно снизилось до 10,7 МПа, при этом добыто 1554 млн. м³ газа, что составляет 33% общего отбора на восточном куполе. Начальное пластовое давление на западном куполе было замерено в 1974 г. в скв. 1 – 17,31 МПа. К концу эксплуатации скважины давление в ней снизилось до 11,83 МПа (т.е. на 32%), а добыто газа 1297 млн. м³, что составляет 61% от общего отбора на западном куполе.

Таблица 1

Оценки начальных запасов газа по горизонту J₁-I, млн. м³

Горизонт	Запасы, утвержденные ГКЗ СССР, A+B+C ₁ , 1971	Запасы, утвержденные ЦКЗ Газпром, A+B+C ₁	Запасы, оцененные по методу МПД	ГКЗ РФ, 2004
J ₁ -I	20165	15647	10850	13283
Добыто	6911	6911	6911	6911
Остаток	13254	8736	3939	6372
%	34,2	44,1	63,7	52,0

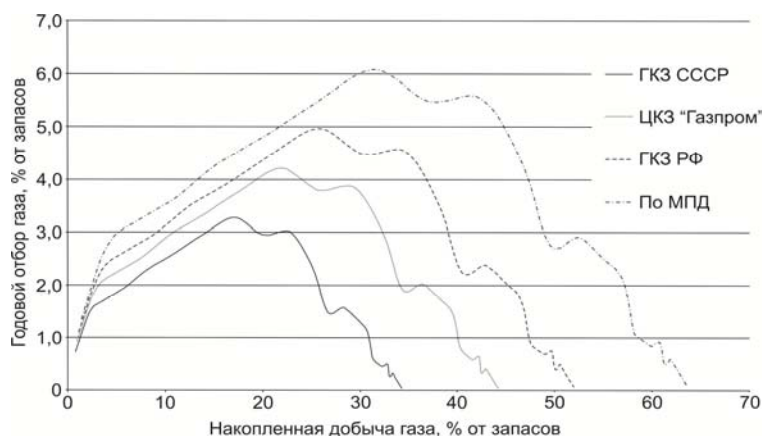


Рис.1. Связь накопленной добычи и годовых отборов газа по залежи J₁-I в процентах от начальных запасов, оцененных в разное время

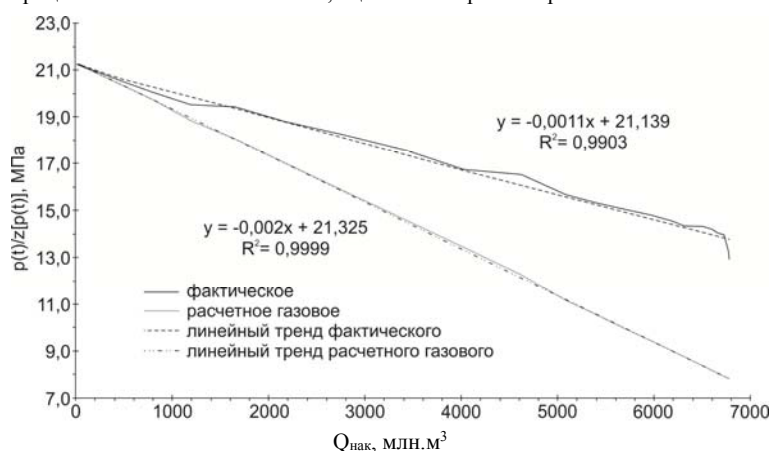


Рис.2. Зависимость $p(t)/z[p(t)]$ от $Q_{\text{нак}}$ фактическое и расчетное газовое для залежи J₁-I

Динамика восстановления пластового давления залежи J₁-I, II

Между тем с 2003 г. геологической службой ОАО «ЯТЭК» (до 2010 г. ГПУ ОАО «Якутгазпром») проводились наблюдения за изменением пластового давления нижнеюрской залежи в наблюдательных скважинах восточного купола скв. 55 и 77 и западного купола скв. 62 и 24. Наблюдения проводились поверенными современными электронными термоманометрами АМТ-06 и АМТ-08 производства фирмы «Грант» г. Уфа, т.е. данные по изменению пластового давления не подлежат сомнению. Некоторые скачки по изменению пластового давления в скважинах могут быть объяснены проведением технических работ в скважинах, например, доливом метанола и др.

На основе сопоставления результатов измерений пластового давления показана динамика восстановления давления по нижнеюрской залежи (табл. 2).

Наблюдаемое относительно интенсивное восстановление пластового давления в залежи J₁-I, теоретически может быть обусловлено следующими факторами:

- перераспределением газа в пласте из защемленных объемов;
- энергией гидродинамической среды;
- притоком газов из нижних частей разреза естественным и техногенным путями;
- переходом в свободную фазу газов, растворенных в подошвенной воде.

Перераспределение газа в пласте из защемленных объемов является наиболее вероятной причиной восстановления давления. Эксплуатация скважин велась при больших депрессиях 1,4–6,6 МПа и максимальных дебитах, что, вероятно, обусловило неравномерное стягивание ГВК, образование пластовых языков и воронок воды и, соответственно, резкое обводнение скважин. Предпринятые меры по изоля-

Залежь единая, пластового типа водоплавающая. Продуктивный пласт (ранее J-I) разделен на три пласта (J ₁ -I ₁ , J ₁ -I ₂ , J ₁ -II) Начальное пластовое давление юрской залежи 17,55 МПа. T _{пл} =41 ⁰ С. Принятая отметка ГВК 1681,5 м.			
Разрабатывалась в 1973–1995 гг. одновременно вводившимися 22 скважинами. Отбор газа 6911 млн.м ³ или 34% от запасов ГКЗ (1971 г.) – 20165 млрд.м ³ или 52% от запасов газа ГКЗ (2004 г.) – 13283 млрд. м ³			
Восточный купол		Западный купол	
Скв. 55	Скв. 77	Скв. 62	Скв. 24
Введена в экспл. в 1977 г., средний дебит 350–420 тыс.м ³ /сут. Работала в 1977–1984 гг. Обводнена в 1984 г.	Пробурена в 1984 г. Низкодебитная, 5 тыс.м ³ /сут	Введена в эксплуатацию в 1983 г., средний дебит 25 тыс.м ³ . Работала в 1983–1984 гг.	Введена в эксплуатацию в 1975–1988 гг., средний дебит с 1975–1981 гг. – 100 тыс.м ³ /сут, после 1981 г. – 40 тыс.м ³ /сут
Накопленный отбор за период 1977–1994 гг. – 728,828 млн.м ³		Накопленный отбор за период 1983–1984 гг. – 3,973 млн.м ³	Накопленный отбор за период 1975–1988 гг. – 75,637 млн.м ³
Давление пластовое, текущее по годам			
16,86 МПа 1977 г.		15,49 МПа 1983 г.	16,78 МПа 1975 г.
12,45 МПа 1991 г.		12,17 МПа 1990 г.	13,18 МПа 1986 г.
13,97 МПа 2003 г.		12,76 МПа 2003 г.	13,46 МПа 2003 г.
14,52 Мпа 2006 г.	13,94 МПа 2006 г.	13,42 МПа 2006 г.	
14,6 МПа 2008 г.	14,16 МПа 2008 г.	13,45 МПа 2007 г.	
	14,32 МПа (1784 м) 16,81 МПа (1812м) 2012 г.	13,65 МПа 2012 г.	13,92 МПа 2012 г.
		Среднее давление в 2012 г. 13,78 МПа	
		13,77 МПа 2013 г.	14,1 МПа 2013 г.
Среднее давление в 2012 г. 14,46 МПа		Среднее давление в 2013 г. 13,84 МПа	
Среднее давление в 2012 г. 14,12 МПа			
Темп восстановления давления за период 1 год			
0,125 МПа	0,067 МПа	0,105 МПа	0,052 МПа
Время в годах восстановления давления до Р _{пл.нач} – 17,55 МПа			
23,5	47,7	36,9	68,5
Расчетное время восстановления давления в залежи до начального (17,55 МПа) 44 года			

ции пластовых вод по отдельным скважинам желаемого эффекта не дали. Дополнительным аргументом в пользу подтягивания воронок воды к эксплуатационным скважинам являются улучшенные ФЕС в нижних частях продуктивного горизонта J₁-I (средняя пористость J₁-I₁ – 0,182, J₁-I₂ – 0,212, J₁-II – 0,231).

При этом особенностью разработки месторождений Хапчагайского мегавала является неравномерный по времени объем добычи. Так как преобладающая часть газового сырья используется для получения тепловой энергии в холодное время года, которое длится 8 месяцев, темпы отбора из скважин в зимнее время увеличиваются в разы, особенно в ноябре–феврале.

Таблица 3

Состав пластовых газов Мастахского ГКМ

Мастахское ГКМ	Юрская залежь, гр/м ³ пластового газа		Залежь Т ₁ -IV, гр/м ³ пластового газа	Пермская залежь, гр/м ³ плас- тового газа
	Скв. 107, 1989 г.	Скв. 76, 1990 г.	Скв. 65, 1995 г.	Скв. 11, 1993 г.
Метан	96,61	96,24	93,14	88,72
Этан	2,54	2,36	4,49	5,76
Пропан	0,32	0,40	1,2	2,3
Изобутан	0,13	0,14	0,21	0,38
Бутан	0,06	0,18	0,24	0,66
С5+ высшие	0,07	0,16	0,39	1,46
Углекислый газ	0,10	0,32	0,13	0,2
Азот	0,17	0,2	0,19	0,51
Гелий	—	—	0,01	0,01

Энергия гидродинамической среды. В нижеюрском-среднетриасовом водоносном комплексе пластовые давления примерно соответствуют условным гидростатическим давлениям.

По данным Л.А. Грубова [3], горизонтальные градиенты напоров подземных вод нижеюрского-среднетриасового комплекса составляют всего 0,0002, т.е. на два–три порядка меньше вертикальных градиентов напоров. Это предопределяет практически застойный режим вод в рассматриваемом гидрогеологическом комплексе.

Застойность подземных вод Вилойской синеклизы во многом предопределена повсеместным распространением зоны многолетнемерзлых пород толщиной 500–600 м, которые надежно изолируют гидрогеологические комплексы от областей питания.

Приток газов из нижних частей разреза.

Приток газов с нижних горизонтов по естественным каналам за короткий промежуток времени (в геологическом понимании) маловероятен. Разный уровень ГВК в приподнятом и опущенном блоках свидетельствует об устоявшемся газогидродинамическом режиме в геологическом времени.

Техногенные притоки нельзя исключать. Залежь J₁-I Мастахского ГКМ, пожалуй, является самой разбуренной на территории Хапчагайского мегавала. Недостаточно высокое качество цементирования колонн скважин может обусловить межпластовые перетоки по затрубному пространству. Свидетельства межпластовых перетоков углеводородных флюидов по затрубному пространству известны во многих выработанных или имеющих долгий срок эксплуатации месторождениях, вплоть до формирования самостоятельных объектов разработки [4–6].

Здесь можно предположить, что опыт строительства скважин в стадии поиска и разведки Мастахского ГКМ в относительно новых геологических и термобарических условиях был невысоким, что, несомненно, обуславливало соответствующее качество цементирования. Дополнительно к этому, исследованиями Н.В. Черского было показано [7], что даже при удовлетворительном качестве цементирования скважин разрушение цементного камня может происходить в результате эффекта дросселирования газа при значительном увеличении его отбора или переходе на свободное фонтанирование.

Свидетельства межпластовых перетоков газа могут быть установлены по изменению химического состава газа. В табл. 3 приведены составы газов юрских, триасовых и пермских залежей. Как видно, состав юрских газов существенно различается от состава газов нижезалегающих горизонтов, особенно по пропану и бутану.

При наличии существенных перетоков газа в юрскую залежь из нижних частей разреза в период с 1990–2013 гг. состав юрского газа должен был измениться, особенно по увеличению содержания пропана, бутана, С5+высшие и азота (в таблице выделены серой заливкой).

Геологической службе ОАО «ЯТЭК» рекомендуется проводить газоконденсатные исследования с целью выявления изменения состава газа для более полного ретроспективного анализа разработки залежи J₁-I.

Переход в свободную фазу газов растворенных в подошвенной воде. Как известно, воды в подошвенной части сильно насыщены растворенными газами. Общая растворенная газонасыщенность составляет 2500–2700 см³/л. В составе растворенного газа преобладает метан – до 95%. Количество тяжелых УВ составляет от 0,6 до 1,5%, азота – от 2,6 до 3,0%, углекислого газа – от 0,3 до 1,5%.

Нужно заметить, нижеюрский продуктивный горизонт приурочен к кызылсырской свите, представленной песчаниками светло-серыми с зеленоватым оттенком, мелко-, средне- и крупнозернистыми, местами известковистыми с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов. Вверх по разрезу наблюдаются постепенная смена средне- и крупнозернистых песчаников мелкозернистыми и увеличение количества и толщины алевролитовых и глинистых пластов. Толщина кызылсырской свиты в пределах Мастахского месторождения изменяется от 183 до 244 м.

Попытаемся оценить объем газа, выделившегося из водонасыщенной части при падении давления с 179 кгс/см² до 124,2 кгс/см². Толщину задействованной водонасыщенной части условно возьмем равной высоте залежи, т.е. –1681,5– (–1626) ≈ 56 м. Толщина кызылсыр-

ской свиты и особенности ее литологического состава позволяют поровое пространство под зеркалом ГВК считать изотропным коллектором до глубин намного ниже – 1737,5 м. Тогда объем водонасыщенной части залежи J₁-I, ограниченный между –1681,5 м и –1737,5 м, составит 5267155700 м³ (подсчитано при помощи программного обеспечения Surfer 8). По прямой экстраполяции при падении пластового давления с 179 кгс/см² до 124,2 кгс/см² общая газонасыщенность пластовых вод снизится до 1700 см³/л, т.е. каждый водонасыщенный литр порового пространства потенциально выделил 1 л свободного газа. Среднюю пористость водонасыщенной части залежи J₁-I примем равной 0,2, а среднюю водонасыщенность – 0,8. Тогда из-за падения пластового давления в результате промышленной эксплуатации водонасыщенная часть залежи потенциально могла выделить 5267155700×0,2×0,8 = 842744912 м³ газа (12% от добытого количества). Таким образом, самые упрощенные расчеты показывают, что объемы потенциально выделившихся из пластовой воды газов могут оказаться весьма существенным фактором релаксации пластового давления залежи J₁-I.

Интересным также является наблюдаемое повышение пластовой температуры во времени. Так, в отчете «Подсчет запасов газа и конденсата по Мастахскому ГКМ» (1971) пластовая температура на середину горизонта J₁-I (глубина в абс. отм. – 1662 м) была принята 38°C. В отчете «Пересчет запасов газа и конденсата по Мастахскому ГКМ» (2004) значение пластовой температуры было уточнено –39°C. В 2007 г. были проведены замеры пластовой температуры в скв. 51 (42,8°C) и скв. 66 (44,2°C). В 2008 г. были проведены замеры пластовой температуры в скв. 66 (43,7°C) и скв. 68 (40°C). В мае 2012 г. по нашей инициативе были произведены замеры пластовых температур в скважинах – 24 (40,4°C), 62 (39,9°C) и 77 (42,7°C). Температура за обозреваемый период увеличилась на 4–5°C. На наш взгляд, это невозможно объяснить наблюдающейся на данном этапе деградацией криолитозоны – сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН установлен факт сокращения толщины криолитозоны со скоростью 1,8 см/год, влиянием которого в течение 40–50 лет можно пренебречь. По всей видимости, наблю-

даемое повышение температуры залежи связано с процессами перетока флюидов между пластами.

Заключение

Проведенные исследования позволяют предположить, что через 40–45 лет пластовое давление в юрской залежи Мастахского ГКМ будет полностью восстановлено. Но будет ли залежь содержать газ в количестве, которое обеспечит рентабельность добычи, большой вопрос. Вместе с тем, опыт разработки залежей Мастахского ГКМ подтверждает необходимость внесения определенных корректив в режимы разработки месторождений Хапчагайского мегавала.

Литература

1. Сафронов А.Ф. Геология нефти и газа. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – 166 с.
2. Сивцев А.И. Причины низкой эффективности разработки Толон-Мастахского ГКМ // Электронное издание «Нефтегазовое дело». http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev_1.pdf с.20.
3. Грубов Л.А. Сравнительная оценка гидродинамических условий различных районов Якутского артезианского бассейна в связи с нефтегазоносностью. Гидрогеологические исследования в нефтегазоносных районах. – Л.: Изд-во ВНИГРИ, 1971.
4. Ларичев В.В., Попков В.И. Геоэкологические проблемы освоения нефтяных и газоконденсатных месторождений Прикаспийской впадины // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. НТЖ № 3. – Астрахань: Издат. дом «Астраханский университет», 2005. – С. 228 – 236.
5. Севастьянов О.М., Захарова Е.Е., Багманова С.В. Методические и практические аспекты изучения газовых залежей переточного происхождения // Достижения, проблемы, перспективы. – Оренбург: ИПК «Газпромпечатать» ООО «Оренбурггазпромсервис», 2002. – С. 78 – 82.
6. Ситников В.С. Необычные скопления нефти и газа, прогноз и методика их поисков в условиях Крайнего Севера // Комплексирование геолого-геофизических методов при обосновании нефтегазопроисловых объектов на Сибирской платформе (в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия)). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2009. – 318 с.; вкл. с. 147–152.
7. Черский Н.В. Конструкция газовых скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 284 с.

Поступила в редакцию 20.12.2014

Структурно-динамическая модель составных сегментов сейсмотектонической зоны Черского (континентальная часть Арктико-Азиатского сейсмического пояса)

Л.П. Имаева, В.С. Имаев, Б.М. Козьмин*

Институт земной коры СО РАН, г.Иркутск,

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

Для создания модели современной геодинамики сейсмотектонической зоны Черского (континентальная часть Арктико-Азиатского сейсмического пояса) проанализированы: структурно-тектоническое положение, параметры глубинного строения, кинематические типы сейсмогенерирующих структур, морфотектонические особенности современного рельефа и соответствующие им поля тектонических напряжений, установленные на основе решений фокальных механизмов очагов местных землетрясений и типов позднекайнозойских складчатых и разрывных деформаций. Установлено, что в условиях транспрессии (сжатие со сдвигом) в пределах локальных сегментов центральной части зоны Черского (Яно-Индиго-Колымский и Индиго-Колымский) имеет место определенная динамическая обстановка, инициированная взаимодействием фронтальных структур зон контактного сопряжения Евразийской и Североамериканской литосферных плит. Подобные условия возможны, если при сближении этих плит Колымо-Омолонский блок во фронтальной части Североамериканской плиты выполнял роль активного индентора. Под его давлением ряд террейнов различной геодинамической природы подвергался горизонтальному сжатию, при котором отдельные блоки сегментов по системе сопряженных разнонаправленных сдвигов различного иерархического ряда выжимались по латерали вдоль орогенного пояса соответственно к северо-западу и юго-востоку, формируя в краевых и фронтальных частях зоны Черского главные сейсмогенерирующие структуры, обладающие максимальным сейсмическим потенциалом.

Ключевые слова: Арктико-Азиатский сейсмический пояс, сейсмотектоническая зона Черского, региональные сегменты, активные разломы, механизм очага землетрясений, типы позднекайнозойских деформаций, Колымо-Омолонский блок, индентор, динамика сейсмогенерирующих структур, структурно-динамическая модель.

To create a model of modern geodynamics of the seismotectonic Chersky zone (continental part of the Arctic-Asian seismic belt) we analyzed its structural-tectonic position, parameters of a deep structure, kinematic types of seismogenic structures, morphotectonic features of the modern relief and corresponding to them tectonic stress fields established on a basis of the solutions of focal mechanisms of local earthquakes centers, as well as the types of the Late Cenozoic fold and discontinuous deformations. It was found that under the transpressional conditions (compression with strike-slip) within the local segments of the central part of the Chersky zone (Yana-Indigirka and Indigirka-Kolyma) there is a certain dynamic situation, initiated by the interaction of the frontal structures of the contact zones of the Eurasian and North American lithospheric plates. Such conditions are possible if during the convergence of these plates the Kolyma-Omolon block in the frontal part of the North American plate as the indenter was active. Under the pressure of the indenter a series of terrains of different geodynamic nature was exposed to horizontal compression. As a result individual blocks of those segments on the system of differently directional strike-slips of different hierarchy were extruded in lateral direction along the orogenic belt respectively to the north-west and the south-east, forming on the edges and front parts of the Chersky zone the main seismogenic structures with a maximum seismic potential.

Key words: Arctic-Asian seismic belt, seismotectonic Chersky zone, regional segments, active faults, mechanism of earthquakes, types of Late Cenozoic deformations, Kolyma-Omolon block, indenter, dynamics of seismogenic structures, structural-dynamic model.

ИМАЕВА Людмила Петровна – к.г.-м.н., с.н.с., imaeva@crust.irk.ru; ИМАЕВ Валерий Сулейманович – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС (Я), г.н.с.; *КОЗЬМИН Борис Михайлович – к.г.-м.н., в.н.с., b.m.kozmin@diamond.ysn.ru.

Введение

Комплексные геолого-геофизические и сейсмологические исследования выявили на территории северо-востока Азии протяженный Арктико-Азиатский сейсмический пояс (ААСП) [3, 11, 13], геодинамические процессы в котором являются индикаторами сейсмотектонических деформационных преобразований земной коры в зонах контактного взаимодействия крупных литосферных плит (Североамериканской и Евразийской). В структурно-тектоническом плане ААСП подразделяется на несколько крупных региональных сегментов (Лаптевоморский, Хараулахский, Черского и Охотоморский) с развитием в их пределах характерных структурных парагенезисов, связанных с определенным типом напряженного состояния земной коры [4, 5, 8]. Обобщение материалов инструментальных наблюдений, принадлежащих филиалам Геофизической службы РАН, СО РАН и Университета штата Мичиган (США), отображенных на карте сводной сейсмичности северо-востока России [12, 13], а также совместный анализ данных геолого-структурных [9] и морфотектонических [6] исследований позволили уточнить динамику сейсмогенерирующих структур, составляющих локальные сегменты сейсмотектонической зоны Черского (СЗЧ) и разработать региональную структурно-динамическую модель.

В процессе исследований решался комплекс следующих задач:

- анализ опубликованных структурно-тектонических, геолого-геофизических и сейсмологических данных, построение дополнительных схем, характеризующих общий морфотектонический план региона;
- выявление сейсмотектонической реактивации позднемезозойской тектонической структуры, установление её влияния на новейший структурный план и тип кайнозойских деформационных процессов;
- проведение структурно-динамического анализа эпицентральных зон сильных землетрясений и определение типов сейсмотектонической деструкции;
- уточнение кинематики движений и разработка региональной структурно-динамической модели главных сейсмогенерирующих структур составных сегментов сейсмотектонической зоны Черского.

По особенностям структурных парагенезисов, связанных с определенным типом напряженного состояния земной коры [2, 3, 9], строению геофизических полей [10, 12], а также общему морфотектоническому плану [4, 5] и динамике

главных сейсмогенерирующих структур [5, 6] в системе мезозойских сейсмотектонической зоны Черского выделяются Яно-Индиго-Колымский (Охотский) локальные сегменты, расположение которых нанесено на рис. 1.

Яно-Индиго-Колымский сегмент СЗЧ в морфотектоническом плане представлен деформационными структурами северного и северо-западного флангов фронтальной зоны взаимодействия между Евразийской и Североамериканской плитами (рис. 2). Зона коллизии, обладающая специфическим от смежных деформационных зон глубинным строением [10, 12], включает коллаж тектонических структур (террейнов), возникших в определенных геодинамических условиях [9], и характеризуется комплексом морфотектонических и разрывных элементов (разломно-блоковых структур) [4, 5].

В структурно-тектоническом плане сегмент включает фронтальные зоны Колымо-Омолонского блока и ряд террейнов (Полуосно-Дебинский, Омудевский, Нагоджинский и др.) различной геодинамической природы, расположенных к северу и северо-западу от среднего течения р. Индиго. По серии северо-западных разломов, преимущественно левосдвиговой кинематики, террейны разобщены на серию разломно-блоковых структур [3, 4], наиболее крупные из которых – Чемагинский, Тас-Хаяхта-ский и Селенныхский.

В становлении современного рельефа Яно-Индиго-Колымского сегмента основную роль играют разломы позднемезозойского времени заложения, активизированные в кайнозое. Анализ кинематических типов активных разломов и деформаций в кайнозойских отложениях [3–6], установленных на северо-восточном фланге Яно-Индиго-Колымского сегмента, показал, что на этой территории развиты дизъюнктивы различного ранга и генезиса преимущественно надвиговой, взбросо-сдвиговой и сдвиговой динамики. Амплитуды горизонтальных перемещений по разломам оцениваются первыми десятками километров [2].

Для анализа динамики формирования сейсмогенерирующих структур сегмента наиболее показательна разломная система, трассируемая в Ильин-Тасской складчатой зоне вдоль осевой части Момского хребта (рис. 2). В плане южные кулисы разнонаправленной системы Ильин-Тасского (левый сдвиг) и Арга-Тасского (правый сдвиг) разломов сопряжены под косым углом примерно в центре Момского хребта, создавая к северо-западу и юго-востоку веерообразные зоны сжатия, представленные широким



Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений и механизмов очагов сильных землетрясений сейсмотектонической зоны Черского (континентальная часть ААСП). Составлена по материалам ГФ РАН и ГС СО РАН: 1–2 – активные разломы: 1 – сдвиги, 2 – надвиги и взбросы; 3 – механизм очагов сильных землетрясений с указанием их даты и магнитуды, белым цветом обозначены области сжатия; 4 – направление движения литосферных плит и блоков; 5 – вулкан Балаган-Тас; 6 – полюс вращения плит. В кружках цифрами обозначены составляющие сегменты сейсмотектонической зоны Черского: 1 – Яно-Индиго-Кольский; 2 – Индигиро-

спектром складчатых деформаций в кайнозойских отложениях Индигиро-Зырянского прогиба и Момо-Селенныхских депрессий [3–6]. Перед фронтальной областью сопряжения закономерно расположена зона растяжения, морфологически представленная субширотной долиной среднего течения р. Мома, где расположен кайнозойский вулкан Балаган-Тас, крупнейшая в мире наледь Улахан-Тарын и наблюдаются многочисленные минерализованные термальные источники подземных вод [1].

Напряженное состояние земной коры исследовалось на основе решений механизмов очагов землетрясений в зоне взаимодействия Колымо-Омолонского блока и Евразийской плиты

(табл. 1). Совместный анализ элементов активной тектоники и проявлений сейсмичности выявил определенную закономерность в развитии типа фокальных механизмов сильных землетрясений и их распределения в пространстве (рис. 2). Так, для землетрясений СЗЧ характерно, что все они происходят в условиях устойчивого северо-восточного сжатия. При этом сжимающие усилия (σ_3) – близгоризонтальны (углы падения 3–44°) и действуют вкрест простирания структурных элементов территории. Напряжения растяжения (σ_1) часто действуют вдоль трасс разломов и ориентированы как горизонтально, так и близвертикально по отношению к земной поверхности (углы падения 2–85°). Оси

Таблица 1

**Параметры фокальных механизмов землетрясений в зоне взаимодействия
Колымо-Омолонского блока и Евразийской плиты**

Дата, год- мес.- число	Время в очаге, час-мин	φ° , N, град	λ° , E, град	M	σ_1		σ_2		σ_3		Тип подвижки	Ис- точник
					Azm	P1	Azm	P1	Azm	P1		
1951-02-12	17-22	65.0	137.0	6.4								[12]
1959-10-30	04-00	66.0	137.5	5.2	-	90	320	00	230	00	B	[12]
1962-04-19	23-16	69.5	138.5	6.2	151	83	292	06	22	05	B	[12]
1968-09-09	02-20	66.2	142.1	5.0	130	43	300	46	38	07	B-C	[12]
1970-06-05	10-31	63.3	146.2	5.4	154	30	346	60	247	06	C	[12]
1971-05-18	22-44	64.0	146.1	6.6	172	09	334	80	82	03	C	[12]
1971-09-30	21-31	61.6	140.4	5.5	16	00	283	88	107	01	C	[12]
1972-01-13	17-24	61.9	147.0	5.3	309	02	44	60	219	29	C	[12]
1974-06-19	03-09	63.2	151.0	4.9	10	08	236	78	101	08	C	[12]
1976-01-21	06-02	67.7	140.2	5.0	313	27	163	58	50	14	C-B	[12]
1979-10-07	01-29	65.0	144.0	4.8	304	69	120	21	211	02	B	[12]
1981-08-29	22-24	65.5	136.4	4.7	101	28	245	57	03	17	C	[12]
1982-09-03	07-29	66.9	133.3	4.5	72	05	177	67	339	20	C	[12]
1983-03-25	10-37	63.6	149.9	4.7	144	69	298	18	32	09	B	[12]
1984-11-22	13-53	68.5	140.8	5.1	288	31	79	56	190	14	C-B	[12]
1985-06-24	03-55	65.3	144.7	4.6	148	44	304	44	46	12	C-B	[12]
1987-02-11	00-58	62.8	156.9	4.9	04	48	274	00	184	42	B	[12]
1999-01-07	18-14	67.6	140.9	5.2	309	06	59	74	218	15	C	[12]
2005-01-25	22-22	69.8	138.3	4.5	112	21	332	64	208	16	C-B	[12]
2006-10-19	07-16	64.1	148.9	5.2	356	31	139	53	254	18	C	[12]
2008-06-22	22-57	67.7	141.3	6.1	313	50	131	40	222	01	C-B	[12]
2013-01-20	10-48	64.9	146.7	5.7	355	30	150	57	258	12	C	[15]
2013-02-14	13-13	67.6	142.5	6.9	324	76	129	13	220	3	H	[15]
2013-05-10	08-38	67.5	139.3	5.4	37	74	127	0	217	14	H	[15]

Примечание. φ , N, λ , E – координаты эпицентра землетрясения: северная широта и восточная долгота соответственно; M – магнитуда землетрясения; σ_1 , σ_2 , σ_3 – напряжение растяжения, промежуточное и сжатия соответственно (Att – азимут оси напряжения, P1 – угол падения, град); тип подвижки: B – взброс, H – надвиг, C – сдвиг, B-C – взбросо- сдвиг, C-B – сдвиго- взброс.

промежуточного напряжения (σ_2) располагаются беспорядочно в пространстве и наклонены к горизонту под углами от 0 до 82°. Такая система напряжений в очагах землетрясений господствует на всем протяжении от Северного Верхоянья до Охотского моря (рис. 1).

Ориентация главных тектонических напряжений, выявленная по сейсмологическим данным, подтверждает, что большинство подвижек в очагах землетрясений СЗЧ соответствует взбросам, надвигам и сдвигам. Из 30 подобных определений 39% составляют взбросы, 30% – сдвиги, 17% – надвиги, остальные – сочетание сдвигов и сбросов (14%). Полученные материалы свидетельствуют, что сейсмический процесс в СЗЧ протекает в условиях господствующего сжатия в зоне активного развития взбросов, сдвигов и их комбинаций (рис. 1). Это отчетливо прослеживается в структурной организации главных сейсмогенных зон всей сейсмотектонической зоны Черского. Так, сгущение эпицентров, группирующееся вдоль линии разлома Улахан, продолжается на левобережье р. Инди-

гирка по трассе Чибгалахского разрывного нарушения, но затем вблизи 140–141° восточной долготы круто меняет своё северо-западное простирание на долготное. При этом полоса эпицентров землетрясений пересекает почти вкрест простирания систему Момо-Селенныхских впадин и вдоль западного склона кряжа Андрей-Тас следует к хр. Полоусный, тяготея к Селенныхскому разлому.

В Яно-Индибирском сегменте выделяется несколько максимумов сейсмической активности (рис. 2). Наибольший максимум располагается в пределах блока Андрей-Тас, где наряду с многочисленными слабыми сотрясениями ранее были отмечены 7-балльное Уядинское событие 1984 г. с $M_s=5.6$, 6–7-балльное землетрясение 1999 г. с $M_s=5.2$, 8-балльное Андрей-Тасское событие 2008 г. с $M_s=6.1$ и 9-балльный Илин-Тасский толчок 2013 г. с $M_s=6.9$. Для многих сильных землетрясений в пределах всей сейсмотектонической зоны Черского ранее были составлены схемы изосейст [3, 4, 7]. Для них обнаруживается четкая тенденция: все

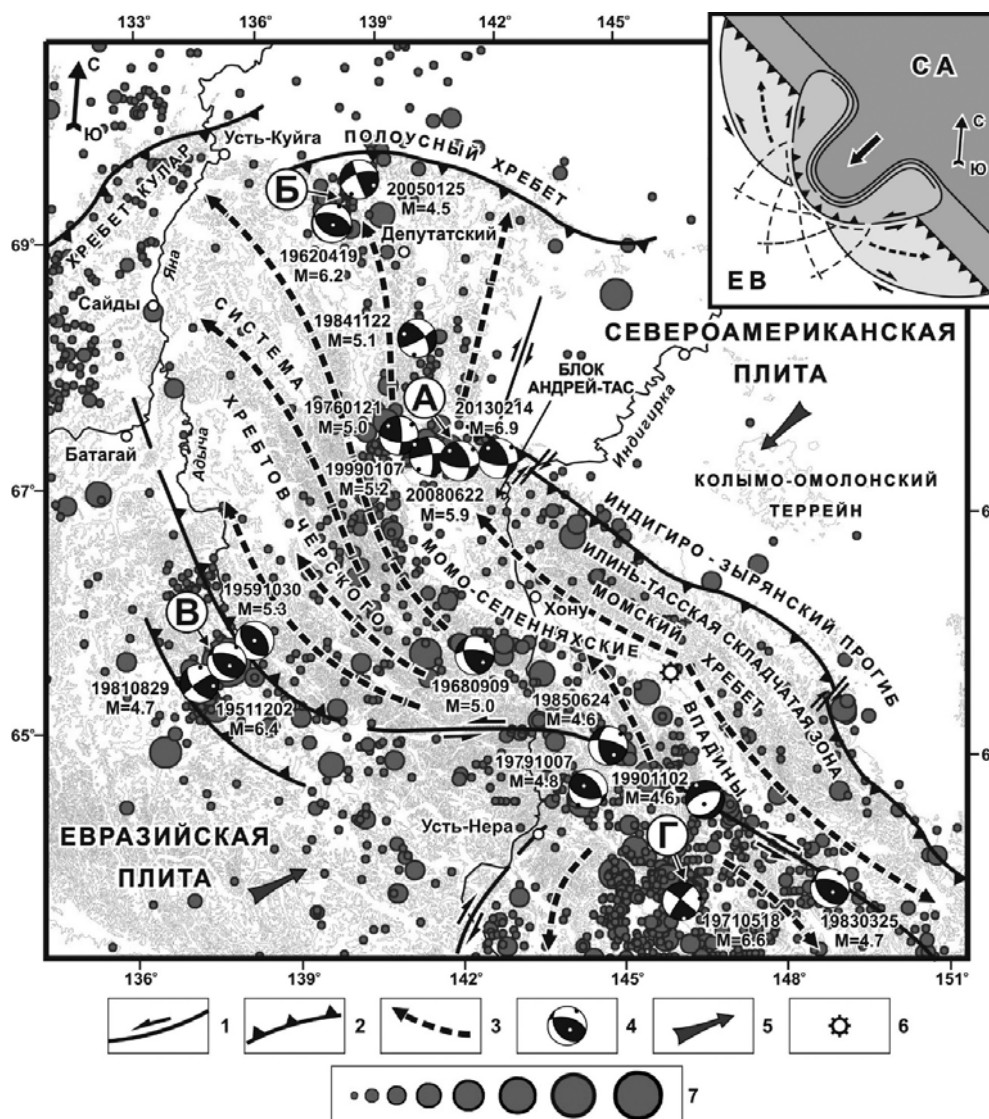


Рис. 2. Схема современной динамики и эпицентров землетрясений Яно-Инди́гирского сегмента сейсмотектонической зоны Черского (ААСП) (по [3, 6], с дополнениями): 1–2 – активные разломы: 1 – сдвиги, 2 – надвиги и взбросы; 3 – направления перемещения блоков; 4 – стереограммы механизмов очагов землетрясений, рядом проставлена дата их возникновения и магнитуда; 5 – направление движения литосферных плит; 6 – вулкан Балаган-Тас; 7 – энергетический класс землетрясений ($K = \lg E$ Дж), равный соответственно: ≤ 9 , 10, 11, 12, 13, 14, 15, ≥ 16 . Максимумы сейсмической активности (прописные буквы): А – Андрей-Тасский, Б – Полоусненский, В – Адычанский, Г – Верхненерский. Во вставке показана упрощенная модель пластической деформации земной коры сейсмотектонической зоны Черского по аналогии с альпийской складчатостью (по [14]), где обозначены литосферные плиты: СА – Североамериканская, ЕВ – Евразийская, а утолщенная стрелка указывает направление действия индентора

изосейсты, оконтуривающие территорию определенной балльности, представляли собой эллипсы, большая ось которых была вытянута в северо-западном направлении вдоль простирания трасс главных сейсмоактивных разломов (табл. 2). Исключение составили лишь землетрясения сейсмического максимума блока Андрей-Тас [3, 6].

Различие между «картиной» изосейст для землетрясений в пределах блока Андрей-Тас, которые перпендикулярно секут линии активных тектонических нарушений, и рисунком изосейст, вытянутых вдоль трасс разломов на северо-западном и юго-восточном флангах сейсмотектонической зоны хр. Черского, можно объяснить максимальным сжатием со стороны Колымо-Омолонского блока (рис. 2). В рассматриваемом районе в зоне контакта между Евразийской и Североамериканской плитами происходит накопление значительных тектонических

напряжений, что способствует активизации сейсмотектонических процессов. Генеральное направление воздействия индентора определяется пространственным положением изосейст, которые под его влиянием оказались расположены поперек структурных элементов в направлении северо-восток–юго-запад по азимуту $50\text{--}85^\circ$. Данная динамическая обстановка способствовала созданию к северу и северо-западу поперечных зон сжатия в виде системы взбросов и надвигов (Полоусно-Дебинский блок), а также широкого спектра складчатых деформаций в кайнозойских отложениях Инди́гиро-Зырянского прогиба.

Таким образом, в пределах Яно-Инди́гирского сегмента в условиях транспрессии (сжатие со сдвигом) имеет место определенная динамическая обстановка, инициированная взаимодействием фронтальных структур зон контактного сопряжения Евразийской и Северо-

Таблица 2

Макросейсмические особенности сильных землетрясений сейсмостектонической зоны Черского

Дата, год-мес.-число	φ° , N, град	λ° , E, град	M	I_0	Форма изосейст	Направление простирания большой оси изосейст	Площадь ощутимых сотрясений, тыс. км ²
1951-02-12	65.0	137.0	6.4	8-9	Круговая	—	~400
1962-04-19	69.5	138.5	6.2	7-8	Эллипс	с-запад-ю-восток	170
1970-06-05	63.3	146.2	5.4	7	—	—	~100
1971-05-18	64.0	146.1	7.0	9	Эллипс	с-запад-ю-восток	900
1971-09-30	61.6	140.4	5.5	7	Эллипс	субдолготное	200
1972-01-13	61.9	147.0	5.3	7	Эллипс	с-запад-ю-восток	200
1974-06-19	63.2	151.0	4.9	6-7	Эллипс	с-запад-ю-восток	160
1984-11-22	68.5	140.8	5.1	7	Эллипс	с-восток-ю-запад	~100
2005-01-25	69.8	138.3	4.5	6	Эллипс	с-запад-ю-восток	~50
2006-10-19	64.1	148.9	5.2	7	Эллипс	с-запад-ю-восток	220
2008-06-22	67.7	141.3	6.6	8	Эллипс	с-восток-ю-запад	300
2013-01-20	64.9	146.7	5.7	7-8	Эллипс	с-запад-ю-восток	160
2013-02-14	67.6	142.5	6.9	9	Эллипс	с-восток-ю-запад	500

Примечание. φ , N, λ , E – координаты эпицентра землетрясения: северная широта и восточная долгота соответственно; M – магнитуда землетрясения; I_0 – интенсивность сотрясений в эпицентре землетрясения в баллах.

американской литосферных плит. Подобные условия возможны, если при сближении литосферных плит роль активного индентора выполнял Колымо-Омолонский блок, находящийся во фронтальной части Североамериканской плиты. Результат такого воздействия проявился в формировании перед фронтальной частью индентора расходящихся северо-западных (левых) и юго-восточных (правых) сдвигов, формирующих на своих окончаниях сейсмогенерирующие системы взбросов и надвигов, обладающих максимальным сейсмическим потенциалом.

Индигово-Колымский (Охотский) сегмент является северным фрагментом Охотоморской коровой плиты и соответствует одноименному террейну. Он располагается к востоку от южного сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса и отделён от последнего Билякчанским разломом северо-восточного простирания. Фундамент Охотского террейна сложен архейскими и раннепротерозойскими кристаллическими сланцами и гнейсами гранулитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма [2, 9]. Большая часть террейна перекрыта полого залегающими континентальными вулканитами Охотско-Чукотского пояса.

Пространственное распределение сейсмичности позволяет выделить в пределах этого сегмента зоны повышенной сейсмостектонической активности, где основную роль играют активные разломы и проявления землетрясений. Инструментальные сейсмологические данные и структурно-тектонические исследования позволяют локализовать здесь три активные зоны, где сейсмичность сгруппирована в протяженные диффузные полосы, приуроченные к зонам динамического влияния разломов, ограничиваю-

щих Охотский блок с запада, северо-востока и юга. В первой из них эпицентры землетрясений концентрируются вдоль Кетандино-Ульбейской системы сдвигов субдолготной ориентации. Фокальные механизмы землетрясений, возникших здесь в 1977, 1984 и 1986 гг., указывают на восток-северо-восточную ориентацию напряжений сжатия и правосдвиговые смещения в их очагах. Вторая полоса сейсмичности приурочена к Индигово-Колымской системе разломов северо-западного простирания. Большинство крупных сейсмических событий в 1974–1992 гг. произошло в зонах влияния Улахан и Чай-Юреинского разломов, где кинематика движений в очагах землетрясений по данным фокальных механизмов соответствовала левым сдвигам, а сжимающие усилия действовали в северо-восточном направлении [4, 8].

Третья полоса приурочена к зоне влияния близширотного Челомджа-Ямского левого сдвига с взбросовой компонентой. Механизм землетрясения 2001 г., эпицентр которого отмечен в плоскости сместителя названного разрыва, также соответствовал левобокowym перемещениям в его очаге. Восточный фланг этого разлома сечет Ланково-Омолонский правый сдвиг северо-восточного простирания, следящийся, как и Челомджа-Ямский дизъюнктив, параллельно береговой линии Охотского моря. С юга к ним примыкает субширотная Северо-Охотоморская система разломов, развитая в прибрежной части Охотского моря между полуостровами Лисянского и Пьягина. Названные системы разрывных нарушений отчетливо выделяются в геофизических полях. Наиболее мобильна северо-восточная граница этого блока, находящаяся в зоне контакта между Североамериканской и

Охотоморской плитой и принадлежащая юго-восточному флангу сейсмотектонической зоны Черского.

Меньший уровень сейсмичности отмечен на западной границе блока в Кетандино-Ульбейской зоне. Повышенная плотность землетрясений фиксируется также на южной границе, где скопление эпицентров землетрясений наблюдается вдоль побережья Охотского моря от г. Охотска до п. Палана на западном берегу Камчатки и в прибрежной к нему северной части ложа Охотского моря, совпадая по простиранию с древней сейсмофокальной зоной Беньофа. Все сейсмические события Охотского блока возникают на глубине до 30 км в пределах земной коры [4, 8].

Сопоставление параметров фокальных механизмов сильных землетрясений и морфокинематических характеристик активных разломов, развитых в пределах Индигиро-Колымского сегмента, указывает на широкое развитие здесь горизонтальных движений в виде крупных сдвиговых систем (табл. 1). При этом вертикальные подвижки (взбросы, надвиги и сбросы) имеют соподчиненное значение. Наиболее ярко горизонтальные смещения представлены эшелонированной системой левых сдвигов на северо-восточной границе блока, среди которых наиболее активен разлом Улахан.

Южная часть блока, охватывающая акваторию Охотского моря, представляет жесткое ядро Охотоморской плиты, которое фактически асейсмично. Краевые части этого блока являются зонами высокой тектонической и сейсмической активности (Камчатка, Курилы, Сахалин и др.). Исключение составляет «асейсмическое окно» между северным сектором Сахалина и Кетандино-Ульбейской зоной в Приохотье, где практически отсутствуют местные землетрясения.

Заключение

Таким образом, выявленная структурная организация главных сейсмогенерирующих зон и динамика очаговых областей сильных землетрясений Яно-Индигирского и Индигиро-Колымского (Охотского) сегментов позволяют предложить следующую региональную структурно-динамическую модель сейсмотектонической зоны Черского. Активные тектонические структуры системы Черского развиваются в обстановке транспрессии (сжатия со сдвигом), обусловленной взаимодействием сближающихся Евразийской и Североамериканской литосферных плит, движущихся друг к другу с разными скоростями [1, 4, 8]. Результатом северо-восточного давления на Евразийскую плиту со сторо-

ны Североамериканской плиты стало формирование перед фронтальной частью Колымо-Омолонского блока (индентора) расходящихся северо-западных левых и юго-восточных правых сдвигов, способствующих появлению на их окончаниях поперечных взбросов и надвигов (рис. 2).

Указанные особенности современной геодинамики сейсмотектонической зоны Черского отражаются в структуре эпицентральных полей местных землетрясений. На участке наибольшего горизонтального сжатия со стороны Колымо-Омолонского индентора—супертеррейна наблюдается максимум сейсмических проявлений в виде Андрей-Тасского сгущения эпицентров землетрясений (рис. 2, А) и продолжающейся от него к юго-западу полосы эпицентров вплоть до р. Адыча (рис. 2, В). Такие же скопления подземных толчков фиксируются по обе стороны от Андрей-Тасского максимума на периферии зоны Черского на участках выжимания горных масс к северу (максимум хр. Полоусного на рис. 2, Б) и юго-востоку (Верхненерский максимум) (рис. 2, Г). При этом наибольшим сейсмическим потенциалом обладает зона блока Андрей-Тас, куда направлены основные тектонические «усилия» со стороны Колымо-Омолонского супертеррейна, расположенного во фронтальной части Североамериканской плиты. Его генеральное северо-восточное направление (азимут 50–85°) совпадает с ориентацией большой оси эллипсов-изосейст, которые были установлены по данным наблюдений макросейсмических эффектов на земной поверхности при Уяндинском, Андрей-Тасском и Илин-Тасском землетрясениях [3].

Следует отметить, что закономерное развитие разломов противоположной кинематики, расходящихся в разные стороны от индентора (одновременное развитие правых и левых сдвигов), типично для многих коллизионных зон и было детально изучено на структурах, возникающих при деформации горизонтального (латерального) выжимания в Альпийско-Гималайском поясе [5–7]. При этом отмечалось, что на участках коллизии литосферных плит, подвергающихся горизонтальному сжатию, материал может выжиматься по латерали вдоль орогенного пояса в места с ослабленным сжатием. В результате сгруживания выжатых масс коры формируются раздувы орогенных поясов и поперечные складчатые зоны. Не исключено, что утонение земной коры, установленное под всей системой хребтов Черского, западнее местоположения системы Момо-Селенныхских впадин [10, 12], своим происхождением обязано процессам растяжения, происходящим в результате вертикального

выжимания вещества и дальнейшего перемещения отдельных пластин (блоков) в противоположном направлении друг от друга (рис. 3).

Подобная динамическая ситуация наблюдается в Яно-Индигирском сегменте сейсмотектонической зоны Черского на участке между реками Яна и Индигирка (рис. 2). Недостаток пространства в районе среднего течения р. Индигирка подчеркивается сужением зон влияния разрывных структур в этом месте, а к северу и югу от шейки разломы расходятся с заметным расширением деформируемого пространства. Отдельные пластины выдвинуты в направлении хр. Полоусный и кряжа Кулар на север и северо-запад, а их взаимоотношение со структурами субширотной ориентации хр. Полоусного выражается разнонаправленным типом смещения по ограничениям блоков (правые и левые сдвиги) и указывает на тенденцию выдавливания материала. На рис. 4 отчетливо дешифрируется первоначальное «выжимание» гранитоидов Буордахского массива и их направление дальнейшего перемещения в северном и северо-западном направлениях.

В результате конвергенции Североамериканской и Евразийской плит Охотоморская плита выталкивается к юго-востоку и востоку [12, 13] с развитием левосторонних движений по разломам в северо-западном сегменте зоны Черского и заливе Шелехова Охотского моря, а также правосторонних перемещений в бассейнах рек Кетанда, Ульбея и Охота в Северном Приохотье и на о. Сахалин. Полученные результаты детальных сейсмотектонических исследований и структурно-динамические модели главных сейсмогенерирующих зон ААСП могут являться базовой основой для проведения общего сейсмического районирования, палеогеодинамических реконструкций и поиска полезных ископаемых.

Данное исследование выполнено в рамках проекта НИР ИГАБМ СО РАН № VIII.66.1.4., а также проекта № 53 Программы РАН 44П «Арктика», интеграционного проекта СО РАН и гранта Министерства науки и образования РФ (Гос. задание № 5.1771.2014/К).

Литература

1. Грачев А.Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии // Физика Земли. – 1996. – № 12. – С. 5–36.

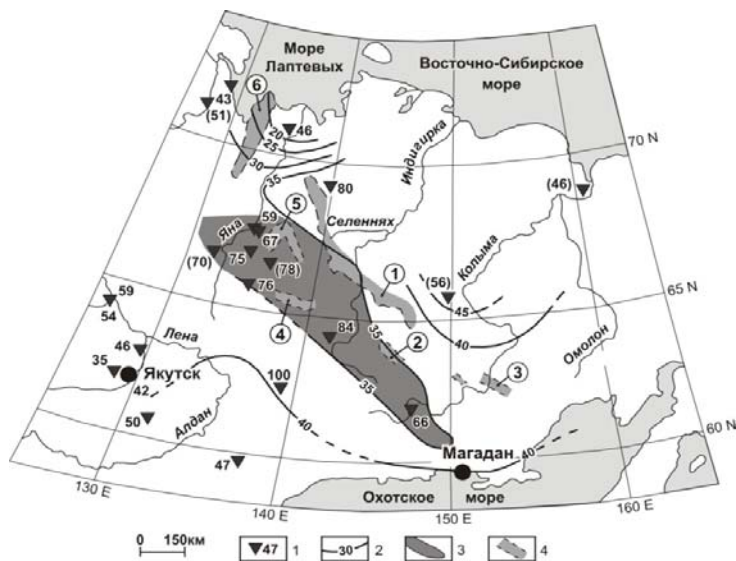


Рис. 3. Схема мощности земной коры Верхояно-Колымской системы мезозой (по [12, 13]): 1 – точечные определения теплового потока в мВт/м^2 ; 2 – изолинии мощности земной коры в км; 3 – область утонения земной коры; 4 – кайнозойские впадины (название в кружках): 1 – Момо-Селеняхские, 2 – Верхненерская, 3 – Сеймчано-Буюндинская, 4 – Верхнеадечанская, 5 – Туостяхская, 6 – Омолуйская

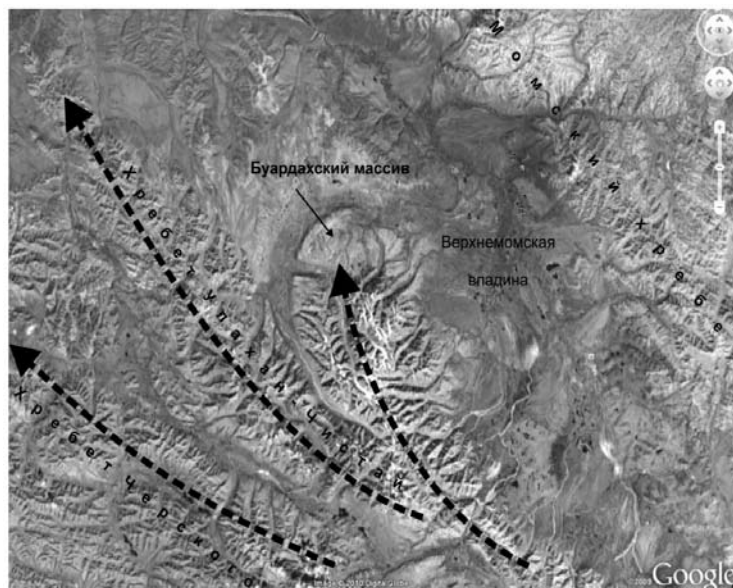


Рис. 4. Структурно-кинематический план и направления перемещения вещества массива Буордах (хребет Улахан-Чистай в системе хр. Черского). Космоснимок с сайта «Google»

2. Гусев Г.С. Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозой. – М.: Наука, 1979. – 207 с.

3. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика очаговых зон сильных землетрясений северо-восточного фланга Момо-Селеняхских впадин // Отечественная геология. – 2011. – № 5. – С. 113–119.

4. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 226 с.

5. Имаев В.С., Имаева Л.П., Маккей К.Г. и др. Гео-

динамика отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 5–17.

6. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Сейсмотектоника северо-восточного сегмента зоны Черского // Отечественная геология. – 2009. – № 5. – С. 56–62.

7. Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.

8. Козьмин Б.М., Имаев В.С., Имаева Л.П. Сейсмичность и современная геодинамика // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: Наука, 2001. – С. 33–67.

9. Парфенов Л.М. и др. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука», 2001. – С. 199–254.

10. Суворов В.Д., Корнилова З.А. Мощность земной коры на юго-востоке Верхояно-Колымской складчатой области // Тихоокеанская геология. – 1986. № 4. – С. 32–35.

11. Chapman M.B., Solomon S.C. North American-Eurasian plate boundary in Northeast Asia // J. Geophys. Res. – 1976. – V. 81, № 5. – P. 921–930.

12. Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G. et al. Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov. 2009. Stephan Mueller Spec. Publ. 2009. Ser., 4. – P. 117–145.

13. Mackey K., Fujita K., Hartse H.E. et al. Seismicity of Eastern Russia 1960–2007: map, 2007. LAUR–04–1381.

14. Moores E.M. and Twiss R.J. Tectonics. – New York: W.H. Freeman and Company, 1995. – 415 p.

Поступила в редакцию 25.11.2014

УДК 551.762(571.56)

Первые данные о проявлении верхнемелового вулканизма зоны перехода «Сибирская платформа – Верхояно-Колымская складчатая область»

А.В. Костин, В.С. Гриненко, О.Б. Олейников, М.С. Желонкина,
И.И. Кривошапкин, А.Е. Васильева

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

На основе анализа теневого рельефа, сопоставления результатов с космическими снимками высокого разрешения и заверки полевыми работами на Лено-Вилуйском водоразделе «зоны перехода» выявлены ранее неизвестная конусообразная вулканическая структура и ассоциирующие поля лав, лавобрекчий и вулканических шлаков. Вулканический конус расположен на нижне-верхнемеловых редуцированных отложениях (104–93,5 млн. лет) хатырынской и аграфеновской свит, соответственно, возраст вулканизма не древнее верхнего мела. Предварительный химический и минералогический анализ вулканических пород позволил отнести их к дацитовому комплексу с крупными ксенолитами и блоками анортозитов.

Ключевые слова: ГИС, теневой рельеф, дациты, анортозиты, вулканизм, верхний мел, Лено-Вилуйский водораздел, Якутия.

On a base of the analysis of a shaded relief, comparison with the satellite images of high resolution and a certification field work on the Leno-Viluy watershed in the transition zone of the «Siberian platform – Verkhoyansk-Kolyma folded area» we revealed a previously unknown volcanic cone structure and associated fields of lava, lava breccia and volcanic slag. The volcanic cone is located on the Lower-Upper Cretaceous reduced sediments (104–93.5 million years) of Hatyrikskaya and Agrafenovskaya suites, respectively, the age of the volcanism is not older than the Upper Cretaceous. Preliminary chemical and mineralogical analysis of the volcanic rocks allowed to attribute them to a dacite complex with large xenoliths and blocks of anorthosites.

Key words: GIS, shaded relief, dacites, anorthosites, volcanism, Upper Cretaceous, Leno-Viluy watershed, Yakutia.

КОСТИН Алексей Валентинович – д.г.-м.н., зав. лаб., kostin@diamond.ysn.ru; ГРИНЕНКО Виталий Семенович – к.г.-м.н., с.н.с.; ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович – к.г.-м.н., зав. лаб., o.b.oleinikov@diamond.ysn.ru; ЖЕЛОНКИНА Мария Сергеевна – ст. лаб.-исследователь, 8(411)233-58-56 п.; КРИВОШАПКИН Иван Иванович – инженер 1-й категории, 8(411)233-58-56; ВАСИЛЬЕВА Александра Ефимовна – м.н.с., lexy_v@rambler.ru.

динамика отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 5–17.

6. Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Сейсмотектоника северо-восточного сегмента зоны Черского // Отечественная геология. – 2009. – № 5. – С. 56–62.

7. Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.

8. Козьмин Б.М., Имаев В.С., Имаева Л.П. Сейсмичность и современная геодинамика // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: Наука, 2001. – С. 33–67.

9. Парфенов Л.М. и др. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука», 2001. – С. 199–254.

10. Суворов В.Д., Корнилова З.А. Мощность земной коры на юго-востоке Верхояно-Колымской складчатой области // Тихоокеанская геология. – 1986. № 4. – С. 32–35.

11. Chapman M.B., Solomon S.C. North American-Eurasian plate boundary in Northeast Asia // J. Geophys. Res. – 1976. – V. 81, № 5. – P. 921–930.

12. Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G. et al. Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov. 2009. Stephan Mueller Spec. Publ. 2009. Ser., 4. – P. 117–145.

13. Mackey K., Fujita K., Hartse H.E. et al. Seismicity of Eastern Russia 1960–2007: map, 2007. LAUR–04–1381.

14. Moores E.M. and Twiss R.J. Tectonics. – New York: W.H. Freeman and Company, 1995. – 415 p.

Поступила в редакцию 25.11.2014

УДК 551.762(571.56)

Первые данные о проявлении верхнемелового вулканизма зоны перехода «Сибирская платформа – Верхояно-Колымская складчатая область»

А.В. Костин, В.С. Гриненко, О.Б. Олейников, М.С. Желонкина,
И.И. Кривошапкин, А.Е. Васильева

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

На основе анализа теневого рельефа, сопоставления результатов с космическими снимками высокого разрешения и заверки полевыми работами на Лено-Вилуйском водоразделе «зоны перехода» выявлены ранее неизвестная конусообразная вулканическая структура и ассоциирующие поля лав, лавобрекчий и вулканических шлаков. Вулканический конус расположен на нижне-верхнемеловых редуцированных отложениях (104–93,5 млн. лет) хатырынской и аграфеновской свит, соответственно, возраст вулканизма не древнее верхнего мела. Предварительный химический и минералогический анализ вулканических пород позволил отнести их к дацитовому комплексу с крупными ксенолитами и блоками анортозитов.

Ключевые слова: ГИС, теневой рельеф, дациты, анортозиты, вулканизм, верхний мел, Лено-Вилуйский водораздел, Якутия.

On a base of the analysis of a shaded relief, comparison with the satellite images of high resolution and a certification field work on the Leno-Viluy watershed in the transition zone of the «Siberian platform – Verkhoyansk-Kolyma folded area» we revealed a previously unknown volcanic cone structure and associated fields of lava, lava breccia and volcanic slag. The volcanic cone is located on the Lower-Upper Cretaceous reduced sediments (104–93.5 million years) of Hatyrikskaya and Agrafenovskaya suites, respectively, the age of the volcanism is not older than the Upper Cretaceous. Preliminary chemical and mineralogical analysis of the volcanic rocks allowed to attribute them to a dacite complex with large xenoliths and blocks of anorthosites.

Key words: GIS, shaded relief, dacites, anorthosites, volcanism, Upper Cretaceous, Leno-Viluy watershed, Yakutia.

КОСТИН Алексей Валентинович – д.г.-м.н., зав. лаб., kostin@diamond.ysn.ru; ГРИНЕНКО Виталий Семенович – к.г.-м.н., с.н.с.; ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович – к.г.-м.н., зав. лаб., o.b.oleinikov@diamond.ysn.ru; ЖЕЛОНКИНА Мария Сергеевна – ст. лаб.-исследователь, 8(411)233-58-56 п.; КРИВОШАПКИН Иван Иванович – инженер 1-й категории, 8(411)233-58-56; ВАСИЛЬЕВА Александра Ефимовна – м.н.с., lexy_v@rambler.ru.

Изучение таежной территории Якутии с помощью современных космических съемок позволяет выделить ранее неизвестные геологические структуры, особенно в районах с плохой обнаженностью. Одно из перспективных направлений – анализ теневого рельефа, построенного на максимально плотной сети радарных топографических съемок, и сопоставление выявленных структур с космическими снимками высокого разрешения.

Объект, выделенный как потенциально магматогенный, впервые был обнаружен в 2010 г. на теневом рельефе Якутии в зоне перехода «Сибирская платформа – Верхояно-Колымская складчатая область»* среди нижне-верхнемеловых отложений. Географически он расположен в истоках рек Лунгха и Тюгене (левые притоки р. Лена) между поселками Асыма и Орто-Сурт неподалеку от Вилюйского тракта [3]. Первоначально он был диагностирован как кольцевая структура диаметром около 3 км, сопровождаемая радиальными разломами. Выявленная структура получила название «Тень-01». Характер проявления структуры «Тень-01» в цифровом рельефе аналогичен мелким изометричным магматогенным телам Центрально-Алданского золоторудного района: сиенит-порфиры (массивы Приалданский, Угоян, Былчынг, Тигдиляннх, Соболдюн, Халынг-Мус, Дария-Дянгыта, Усть-Селигдар, Селигдар); щелочные пикробазальты (диатрема Опытная), поэтому было сделано предположение о ее магматогенной природе. Выявленный вулканический конус приурочен к установленному при дешифрировании снимка Landsat-8 тектоническому нарушению северо-западного простираения протяженностью около 50 км и является первым установленным на востоке Сибирской платформы.

Описание вулканического аппарата и слагающих его пород

В 2014 г. структура «Тень-01» была заверена полевыми работами. Установлено, что по форме она представляет собой практически правильный конус с пологими склонами, усеченный приблизительно на одну треть и возвышающийся на 70 м над окружающей местностью. Основание конуса является почти правильным кругом, диаметром 2,5 км. Усеченная поверхность

конуса ровная, пологая, наклонена к востоку, имеет неправильную округлую форму диаметром около 800 м и покрыта растительным покровом. Сам конус имеет хорошую сохранность (рис. 1), что свидетельствует о его относительно молодом возрасте. Обнаженность данной возвышенности плохая, однако, все редкие сохранившиеся на склонах делювиальные и коренные выходы сложены вулканическими породами. Объем конуса вычислен по цифровому рельефу программным комплексом MicroDem и составляет 133,3 млн.м³. Данное значение позволяет косвенно оценить возможный объем вулканического материала.

Вулканические породы представлены лавами и лавобрекчиями с пористой и ноздреватой структурой и темной окраской (рис. 2). Лавы по составу относятся к дацитам (табл. 1, ан. № 1–12) и андезитам (табл. 1, ан. 13). Лавы в силу своей вязкости не всегда изливались на дневную поверхность. Зачастую они «выдавливались» из подводящего канала и, не прорывая меловые песчаники батылхского горизонта, формировали неглубоко залегающие лакколитообразные локальные лавовые скопления. В этих случаях вышезалегающие песчаники испытывали температурное воздействие, обжигались и частично ассимилировались лавами. Цвет температурно-преобразованных песчаников становился красноватым и бурым и такие породы получили название «горельники».

В лавах в переменном количестве присутствуют обожженные или частично растворенные разноразмерные обломки вмещающих песчаников и глинистых сланцев. Это в целом свидетельствует о значительной роли контаминации коровым материалом родоначальных магм, что могло сказаться на специфике их химического состава. В лавах также присутствуют крупные (до нескольких м) ксенолиты интрузивных анортозитов.

Химический состав слагающих вулканический конус пород приведен в табл. 1. На классификационной диаграмме (рис. 3) отчетливо видно, что все они образуют компактное поле в области дацитов, и только одна проба соответствует андезитам. Две пробы лавы (табл. 1, ан. 14, 15) образуют отдельное самостоятельное поле и по составу соответствуют интрузивным анортозитам, не имеющим вулканических аналогов. Такие породы имеют офитовую местами пойкилитовую структуру и состоят на 75% из полевого шпата и 25% из клинопироксена (рис. 4). Полевой шпат по химическому составу (табл. 2) является анортитом, клинопироксен относится к группе Са-пироксенов, а благодаря необычно высокому содержанию Al₂O₃ соот-

*Под зоной перехода подразумевается территория, охватывающая погребенные структуры чехла восточного обрамления Сибирской платформы и складчатые деформационные сооружения Верхоянского складчато-надвигового пояса Верхояно-Колымской складчатой области [1, 2].

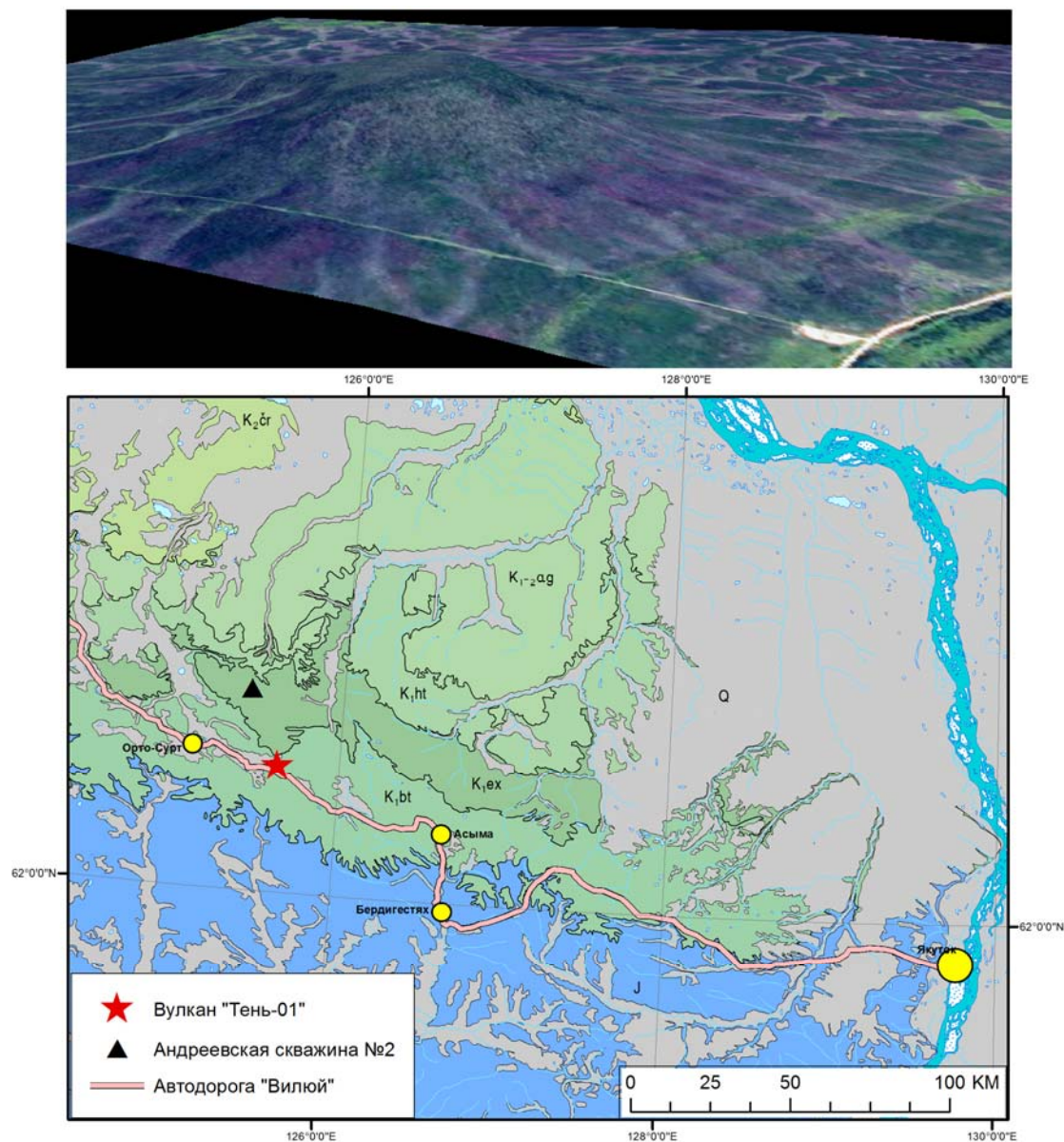


Рис. 1. Вулкан Тень-01: 3D композит цифрового рельефа и снимка Bing Map (координаты жерла вулкана: широта 62.50°, долгота 125.72°) и геологическая карта с местом его расположения.

Юрская система (нерасчлененная) – J; меловая система, нижний отдел, батылхская – K_{1bt} , эксеняхская – K_{1ex} и хатырыкская – K_{1hr} свиты; нижний–средний отделы: аграфеновская – K_{1ag} свита; верхний отдел: чиримыйская – K_{1cr} свита; четвертичная система (нерасчлененная) – Q

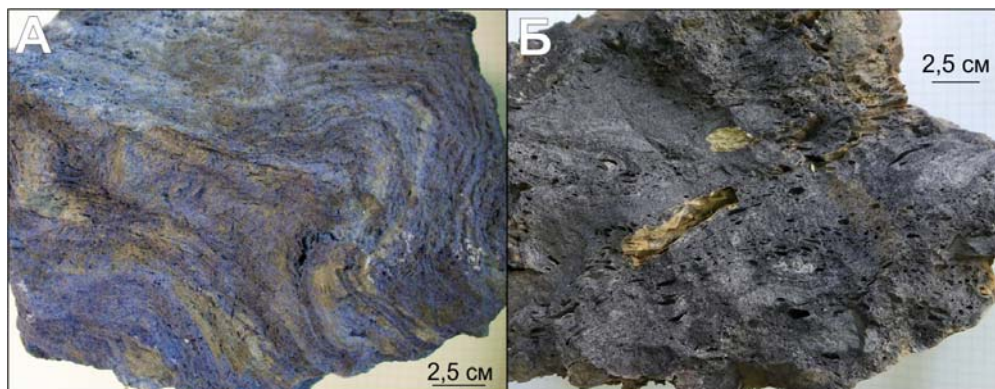


Рис. 2. Образцы вулканических пород вулкана Тень-01: лава (А), вулканический шлак (Б)

Таблица 1

Химический состав пород вулкана Тень-01, %

Образец	10101	10103	10106-1	10106-2	10106-3	10107-1	10107-2	10108a
№	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	62,87	65,58	65,2	64,58	65,67	67,06	66,12	66,5
TiO ₂	0,83	0,72	0,89	0,76	0,71	0,61	0,72	0,58
Al ₂ O ₃	16,97	16,75	17,21	17,35	16,89	16,42	16,49	16,89
Fe ₂ O ₃	4,07	3,07	3,58	2,8	2,45	2,7	1,63	3,15
FeO	2,41	1,39	0,66	2,51	2,76	0,96	2,21	1,86
MnO	0,05	0,04	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
MgO	2,39	1,97	1,47	1,78	2,02	1,28	1,32	1,33
CaO	3,08	2,72	3,14	3,01	2,44	3,35	3,29	3,01
Na ₂ O	2,9	3,1	3,05	2,91	2,79	3,3	3,38	3,28
K ₂ O	2,43	2,39	1,73	2,42	2,45	2,3	2,2	2,23
H ₂ O-	0,56	0,16	0,68	0,3	0	0,36	0	0,4
H ₂ O+	1,68	1,43	1,97	1,16	1,44	1,54	1,58	0,99
PPP	0	0,19	0	0	0	0	0,15	0
P ₂ O ₅	0,23	0,25	0,34	0,21	0,17	0,22	0,33	0,21
CO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0,03	0,05
Сумма	99,92	99,63	99,34	99,54	99,83	99,79	99,49	100,53

Образец	10108б	10108в	10108/46	10108/5	10108/6	10104/1	10104/2
№	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	64,7	63,99	61,55	61,67	59,02	44,53	43,35
TiO ₂	0,72	0,62	0,83	0,87	0,95	1,2	1,27
Al ₂ O ₃	17,35	18,99	18,48	18,83	19,2	26,95	22,96
Fe ₂ O ₃	3,47	2,48	4,2	7,03	7,08	8,07	10,13
FeO	1,96	2,41	2,72	0,71	1,1	0,83	1,93
MnO	0,04	0,03	0,05	0,05	0,07	0,2	0,2
MgO	1,92	1,73	2,79	2,83	3,23	1,71	2,91
CaO	2,99	2,9	2,48	2,3	2,05	14,74	16,38
Na ₂ O	3,2	3,14	2,63	2,35	2,26	0,15	0,17
K ₂ O	2,52	2,4	2,87	2,75	3,25	0,61	0,77
H ₂ O-	0,44	0,34	0,4	0	0,3	0,42	0,28
H ₂ O+	0,78	0,88	0,67	0,08	0,75	0,68	0,37
PPP	0,05	0,02	0,07	0,04	0	0	0
P ₂ O ₅	0,25	0,24	0,23	0,15	0,21	0,08	0,02
CO ₂	0	0	0	0	0,54	0,54	0
S	0,07	0,02	0,05	0,03	0	0,04	0
Сумма	100,46	100,19	100,02	99,69	100,01	100,75	100,46

Примечание. Аналитики: Г.Н. Охлопкова, С.Л. Васильева (ИГАБМ СО РАН).

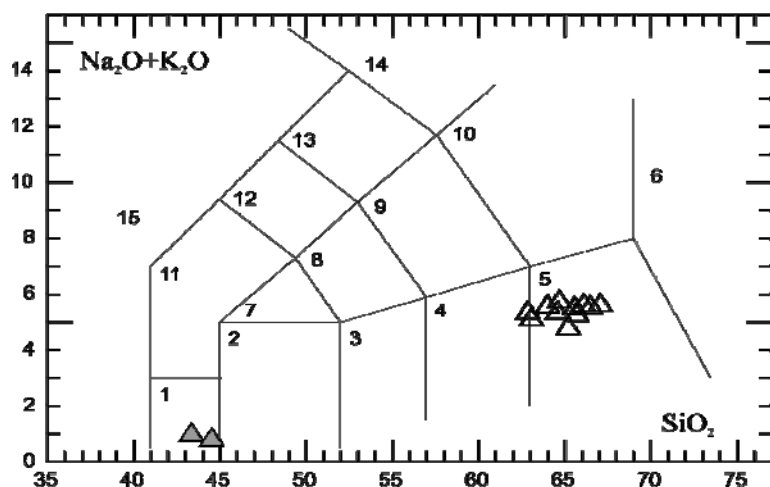


Рис. 3. Положение пород вулкана Тень-01 на классификационной диаграмме: 1 – пикробазальт (вулканические аналоги анортозита не известны); 2 – базальт; 3 – андезитобазальт; 4 – андезит; 5 – дацит; 6 – риолит; 7 – трахибазальт; 8 – базальтовый трахиандезит; 9 – трахиандезит; 10 – трахит-трахиандезит; 11 – тефрит-базанит; 12 – фонотефрит; 13 – тефрифонолит; 14 – фонолит; 15 – фойдит

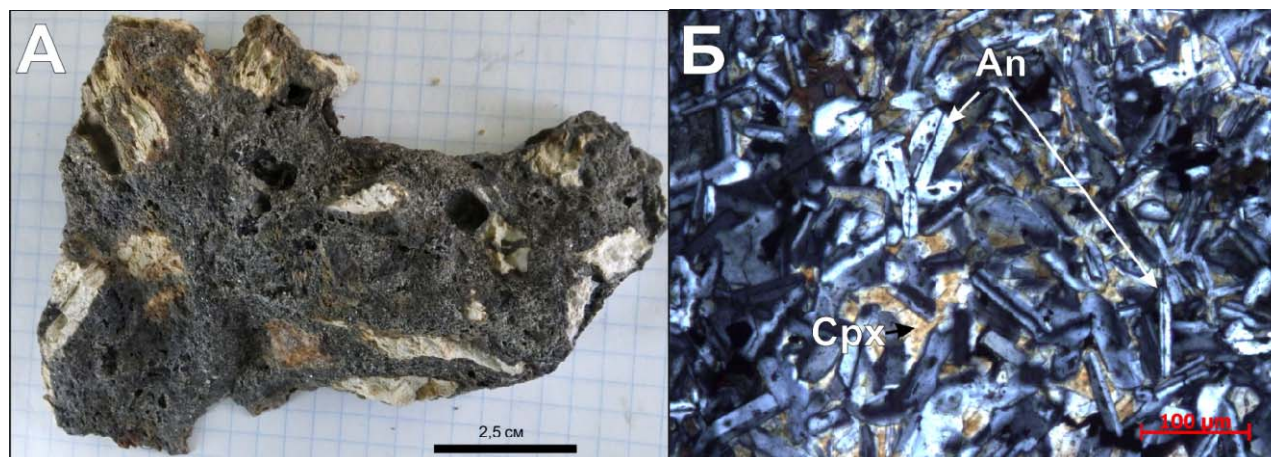


Рис. 4. Анортосит с ксенолитами измененного высокоглиноземистого (светлое) материала (А) и офитовая структура анортосита (шлиф), состоит из анортита (75%) и авгита (25%) (Б). An – анортит, Срх – Са-пироксен – эссенеит

Т а б л и ц а 2

Химический состав породообразующих минералов анортосита, %

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO	FeO	Сумма
Анортит						
	34,11	43,85	19,7		2	99,66
	34,38	43,87	20,47		1,49	100,21
	34,4	42,32	20,81		1,66	99,19
	34,54	43,79	19,81		1,4	99,54
	35,99	44,37	20,46			100,82
	37,11	44,38	16,86	0,83	0,7	99,88
Эссенеит (CaFe ³⁺ AlSiO ₆)						
4,03	14,09	34,11	23,27	3,94	20,23	99,67
2,2	14,54	29,59	24,92	6,12	23,42	100,79
5,58	15,6	33,96	24,43	1,21	16,93	97,71
4,61	15,99	35,59	24,59	1,61	18,05	100,44
5,57	16,17	35,52	24,28	1,61	17,77	100,92
5,14	16,26	34,4	24,56	1,4	19,29	101,05

Примечание. Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480 LV, аналитик С.К. Попова.

ветствует эссенеиту. По данным рентгенофазового анализа наиболее близкие для минерала дифрактограммы соответствуют авгиту (анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на дифрактометре D2 PHASER Bruker, аналитики Н.В. Заякина, Т.Ф. Тронина). Отдельные окрашенные в зелено-черный цвет призматические кристаллы клинопироксена, приуроченные к пустотам, достигают 1 см по длинной оси, в то же время в основной массе их размер не превышает 1–2 мм.

Обоснование геологического возраста вулканической постройки

Стратификация и иерархическая соподчиненность геологических тел вмещающего осадочного комплекса важны для обоснования нижней возрастной границы вулканической активности в данном районе востока платформы.

Меловые отложения в районе развития вулканических пород расчленены на стратиграфические подразделения с местными географическими названиями (рис. 5). Все они закартированы разномасштабными съемками и изучены глубоким бурением [4].

Меловые образования на западном склоне Верхоянского хребта начинаются сменой в Лено-Вилуйском районе Вилуйско-Предверхолянской структурно-фациальной зоны (бассейны рек Леписке и Чечума) позднеюрского (157,1–145,8 млн. лет) чечумского фитохронологического горизонта (марыкчанская и бергеинская свиты верхней юры) на батылхский, характеризующий начало раннего этапа (145,8–124,5 млн. лет) формирования нижней части мелового молассового комплекса (батылхская свита). Эксеняхский фитохронологический горизонт соответствует одноименной свите и объему апта (124,5–112 млн. лет). Хатырыкский фитохронологический горизонт в объеме хатырыкской свиты отвечает нижней части альба (112–104 млн. лет).

Мощность нижнего мела в районе исследований изменчива. По данным бурения ряда глубоких скважин на нефть и газ в данном районе Предверхолянского прогиба она может достигать более 2,4 км (соответственно, при мощности свит, снизу вверх: батылхская до 1100 м, эксеняхская до 450 м и хатырыкская до 900 м) [5].

Осадки нижне-верхнемеловой аграфеновской свиты (Лено-Вилуйский район) в объеме верхов альба и низов сеномана (104–93,5 млн. лет) характеризуют нижнюю часть верхней молассы терригенного комплекса мела востока Сибирской платформы. Аграфеновская свита залегает с разрывом на хатырыкской. Выше по разрезу аграфеновская свита с разрывом перекрыта верхнесеноман-кампанскими (93,5–86,6 млн. лет)

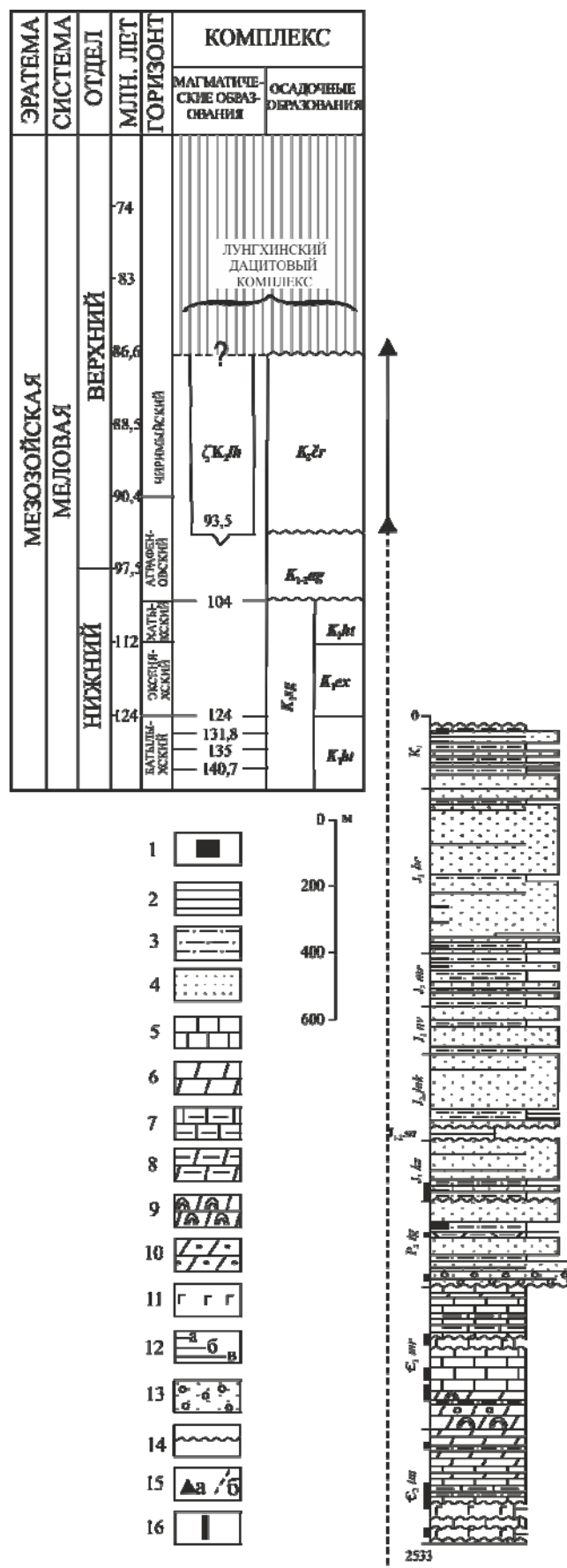


Рис. 5. Стратиграфический разрез Андреевской скважины 2 глубокого бурения на нефть и газ (Лено-Виллюйский район Виллюйско-Предверхоанской СФЗ Восточно-Сибирской СФО). Заимствовано из работы [2], с добавлениями и изменениями.

Названия стратифицированных геологических тел с местными географическими названиями (комплекс, серия, свита) и их аббревиатура. Кембрийская система, средний отдел: тымпинская (Є_{2tm}), верхний отдел: мирнинская (Є_{3mr}) свиты. Пермская система, нижний-верхний отделы: тогойдохская (P_{1-3tg}) свита. Юрская система, нижний отдел: кызылсырская (J_{1kz}) свита; нижний-средний отделы, джикимдинская серия: сунтарская (J_{1sn}) и якутская (J_{2jak}) свиты; средний-верхний отделы, чечумская серия: нижневиллюйская (J_{2nv}), марыкчанская (J_{3mr}) и бергеинская (J_{3br}) свиты. Меловая система, нижний отдел, сангарская (K_{1sg}) серия: батылхская (K_{1bt}), эксеняхская (K_{1ex}) и хатырыкская (K_{1hr}) свиты; нижний-средний отделы: аграфеновская (K_{1ag}) свита; верхний отдел: чиримыйская (K_{1cr}) свита и лунгхинский дацитовый (Є_{2lh}) комплекс (вулканические аппараты и лавовые потоки в виде покровов: дациты).

Литологические разновидности пород (1-12): 1 – угли; 2 – алевролиты мелкозернистые; 3 – алевролиты крупнозернистые; 4 – песчаники; 5 – известняки; 6 – доломиты; 7 – мергели; 8 – доломиты глинистые; 9 – доломиты водорослевые; 10 – доломиты органогенные; 11 – основные эффузивы; 12 – немасштабные прослои или закономерное чередование слоев (а – углей; б – алевролитов мелкозернистых; в – алевролитов крупнозернистых); 13 – отдельные включения галек; 14 – стратиграфический перерыв; 15 – вулканическая форма проявления лунгхинского дацитового комплекса (а) и фриотическая форма – внедрение трещинной интрузии по подводящему каналу (б); 16 – забой скважины (в м) и положение пунктов отбора керна

образованиями верхнемеловой чиримыйской свиты. Кровля и подошва чиримыйской свиты редуцированы. Формирование свиты занимает интервал от 93,5 до 86,6 млн. лет – верхняя часть сеномана-коньякское время [6].

Следует отметить, что Андреевская скважина вскрыла меловые образования в объеме готерив-баррема (батылхская свита). По данным ПГО «Ленанефтегазгеология», мезозойская часть разреза скважины расчленена по совокупности промыслово-геофизических данных и включает маломощные (первые см – до 1,2–1,5 м) прослои углей хорошей сохранности и глинисто-углистых (первые см – 0,5 м). Другими скважинами вскрыты разрезы эксеняхской и хатырыкской свит. В большинстве случаев маломощные угли встречаются только в последней. Нижний-верхний мел представлен аграфеновской и чиримыйской свитами, в которых, по данным глубокого бурения на нефть и газ, отмечаются маломощные прослои углей хорошей сохранности.

С учетом несоразмерного количества углей в разрезе и размера вулканического аппарата представляется маловероятным, что вулканические породы являются продуктом плавления осадочных пород в результате термального воздействия самовозгорающихся углей.

Выводы

Впервые на территории Лено-Вилуйского водораздела полевыми работами подтверждена вулканогенная природа структуры, выявленной в результате обработки средствами ГИС теневоего рельефа. Породы вулкана относятся к дацитам, реже – андезитам, их геологический возраст соответствует рубежу 93,5–86,6 млн. лет. В жерловой части вулкана установлены крупные ксенолиты и блоки анортозитов.

Вулканический аппарат «Тень-01» начал формироваться на стратиграфически выравненной (размытой) поверхности, кровля которой была образована в нижне-среднемеловое аграфеновское время. Он продолжал синхронно взаимодействовать уже в верхнемеловое время (до рубежа 86,6 млн. лет) с чиримыйской свитой в континентальных условиях осадконакопления.

В позднеэоцено-коньякское время в «зоне перехода» был сформирован вулканический стратифицированный комплекс, синхронный формированию на востоке Сибирской платформы верхнемеловой чиримыйской свиты. Его название «**лунгхинский дацитовый комплекс**» дано по р. Лунгха (левый приток р. Лена, Западная Якутия).

Литература

1. *Гриненко В.С., Князев В.Г.* Новые данные о стратиграфии и районировании юрских отложений

западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области // Вестник Госкомгеологии: материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия). – 2010. – 1 (9). – С. 26–38.

2. *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.

3. *Костин А.В.* Моделирование карты теневого рельефа Якутии средствами ГИС для прогнозирования потенциальных рудно-магматических систем // Наука и образование. – 2010. – №1. – С. 63–70.

4. *Гриненко В.С., Камалетдинов В.А.* при участии Щербакова О.И. Схема корреляции разрезов // Геологическая карта Якутии масштаба 1:500 000. Центрально-Якутский блок. Лист Р-51-А,Б. – СПб.: Санкт-Петербургская картфабрика ВСЕГЕИ, 2000б.

5. *Гриненко В.С.* Меловые континентальные образования востока Сибирской платформы // Отечественная геология. – 2007. – №1. – С. 110–118.

6. *Гриненко В.С., Жарикова Л.П.* Верхний мел Вилуйской синеклизы: состояние изученности, проблемы расчленения и корреляции (восток Сибирской платформы) // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: материалы Четвертого Всероссийского совещания 19–23 сентября 2008 г., г. Новосибирск / Под ред. О.С. Дзюба, В.А. Захарова, Б.Н. Шурыгина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 64–66.

Поступила в редакцию 21.11.2014

УДК 556.38:556.33

О методике районирования бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод для целей водоснабжения

Л.Д. Иванова, Н.А. Павлова, В.В. Шепелев

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

В результате анализа и обобщения материалов гидрогеологических исследований предлагается методика районирования территории бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод на основе структурно-гидрогеологического принципа с учетом мерзлотной обстановки и гидрогеохимических особенностей подземных вод. Рассматриваются этапы работ по составлению карты районирования бассейна р. Лены.

Ключевые слова: гидрогеологический этаж, гидрогеологические структуры, база геоданных, надмерзлотные грунтовые воды, подмерзлотные воды, районирование.

ИВАНОВА Лена Дмитриевна – вед. инженер; ПАВЛОВА Надежда Анатольевна – зав. лаб., pavlova@mpi.ysn.ru; ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич – д.г.-м.н., акад. АН РС (Я), зам. директора, sheply@mpi.ysn.ru.

Выводы

Впервые на территории Лено-Вилуйского водораздела полевыми работами подтверждена вулканогенная природа структуры, выявленной в результате обработки средствами ГИС теневоего рельефа. Порода вулкана относится к дацитам, реже – андезитам, их геологический возраст соответствует рубежу 93,5–86,6 млн. лет. В жерловой части вулкана установлены крупные ксенолиты и блоки анортозитов.

Вулканический аппарат «Тень-01» начал формироваться на стратиграфически выравненной (размытой) поверхности, кровля которой была образована в нижне-среднемеловое аграфеновское время. Он продолжал синхронно взаимодействовать уже в верхнемеловое время (до рубежа 86,6 млн. лет) с чиримыйской свитой в континентальных условиях осадконакопления.

В позднеэоцено-коньякское время в «зоне перехода» был сформирован вулканический стратифицированный комплекс, синхронный формированию на востоке Сибирской платформы верхнемеловой чиримыйской свиты. Его название «**лунгхинский дацитовый комплекс**» дано по р. Лунгха (левый приток р. Лена, Западная Якутия).

Литература

1. *Гриненко В.С., Князев В.Г.* Новые данные о стратиграфии и районировании юрских отложений

западной периферии Верхояно-Колымской складчатой области // Вестник Госкомгеологии: материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия). – 2010. – 1 (9). – С. 26–38.

2. *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.

3. *Костин А.В.* Моделирование карты теневого рельефа Якутии средствами ГИС для прогнозирования потенциальных рудно-магматических систем // Наука и образование. – 2010. – №1. – С. 63–70.

4. *Гриненко В.С., Камалетдинов В.А.* при участии Щербакова О.И. Схема корреляции разрезов // Геологическая карта Якутии масштаба 1:500 000. Центрально-Якутский блок. Лист Р-51-А,Б. – СПб.: Санкт-Петербургская картфабрика ВСЕГЕИ, 2000б.

5. *Гриненко В.С.* Меловые континентальные образования востока Сибирской платформы // Отечественная геология. – 2007. – №1. – С. 110–118.

6. *Гриненко В.С., Жарикова Л.П.* Верхний мел Вилуйской синеклизы: состояние изученности, проблемы расчленения и корреляции (восток Сибирской платформы) // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: материалы Четвертого Всероссийского совещания 19–23 сентября 2008 г., г. Новосибирск / Под ред. О.С. Дзюба, В.А. Захарова, Б.Н. Шурыгина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 64–66.

Поступила в редакцию 21.11.2014

УДК 556.38:556.33

О методике районирования бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод для целей водоснабжения

Л.Д. Иванова, Н.А. Павлова, В.В. Шепелев

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

В результате анализа и обобщения материалов гидрогеологических исследований предлагается методика районирования территории бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод на основе структурно-гидрогеологического принципа с учетом мерзлотной обстановки и гидрогеохимических особенностей подземных вод. Рассматриваются этапы работ по составлению карты районирования бассейна р. Лены.

Ключевые слова: гидрогеологический этаж, гидрогеологические структуры, база геоданных, надмерзлотные грунтовые воды, подмерзлотные воды, районирование.

ИВАНОВА Лена Дмитриевна – вед. инженер; ПАВЛОВА Надежда Анатольевна – зав. лаб., pavlova@mpi.ysn.ru; ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич – д.г.-м.н., акад. АН РС (Я), зам. директора, sheply@mpi.ysn.ru.

As a result of the analysis and summarizing of hydrogeological investigations, a method of zoning of the Lena River basin on prospects of underground waters use has been proposed. The method is based on structural-hydrogeological principle taking into account permafrost conditions and hydro-geochemical peculiarities of ground waters. Stages of work on creating of the Lena River basin zoning map are considered.

Key words: hydrogeological stage, hydrogeological structures, geodata base, suprapermafrost groundwaters, subpermafrost waters, zoning.

Состояние вопроса

В Якутии одним из факторов, осложняющих изучение и использование подземных вод, является наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород, служащей криогенным водопором и разделяющей гидрогеологический разрез на два этажа. Первый этаж включает подземные воды зоны свободного водообмена (надмерзлотные и надмерзлотно-межмерзлотные). Эти воды наиболее доступны для извлечения, а водозаборы, базирующиеся на их эксплуатации, экономически рентабельны. Однако в области сплошного развития многолетнемерзлых пород надмерзлотные воды распространены преимущественно лишь под акваториями озер и в долинах рек и часто имеют ограниченные ресурсы. Ко второму этажу относятся подземные воды зоны затрудненного водообмена (подмерзлотные). В платформенных областях подмерзлотные водоносные горизонты, как правило, имеют широкое распространение и большие мощности, а в горно-складчатых районах приурочены к маломощной (до 50 м) зоне криогенной дезинтеграции пород [1]. Недостатками, осложняющими эксплуатацию подмерзлотных водоносных комплексов, являются их глубокое залегание, преимущественно низкие пьезометрические уровни подземных вод, повышенная их минерализация и высокие концентрации отдельных химических компонентов.

Общая характеристика условий использования пресных подземных вод для водоснабжения Западной и Восточной Сибири рассмотрена С.М. Фотиевым [2]. В зависимости от природных факторов, определяющих возможность использования природных вод для целей водоснабжения, им выделены три провинции: перспективные, относительно перспективные и малоперспективные. Бассейн р. Лены, согласно предложенной схеме, расположен в пределах перспективной и малоперспективной провинций.

Для более углубленного анализа и решения проблем современного состояния и использования подземных вод бассейна р. Лены для водоснабжения населенных пунктов и применения их как минерально-сырьевого ресурса требуются систематизация и обобщение большого объ-

ема разностороннего фактического материала. Это можно сделать при районировании бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод. При этом следует учитывать, что при построении гидрогеологических карт любого содержания всегда существует вероятность гидрогеологических рисков, связанных с недостаточным учетом отдельных факторов и слабостью изученностью подземных вод [3].

Общая характеристика предлагаемой методики

Для рассматриваемой территории свойственна значительная неоднородность геологических, структурных, геоморфологических мерзлотных и гидрогеологических условий, создавших многообразие химического состава подземных вод и их минерализации. С учетом этого на современном этапе оптимальным, безусловно, является районирование территории бассейна р. Лены путем создания ГИС-проекта и построения пространственных моделей в программе ArcGis. Это даст возможность снизить риски путем внесения уточнения и исправления в уже построенную модель по мере поступления новых данных.

Предлагаемая методика составления карты районирования территории бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод основывается на выделении и картографировании ведущих компонентов геологической среды (характера распространения и строения многолетнемерзлых пород, состава водовмещающих пород, типов подземных вод по условиям залегания, их минерализации, химического состава, ресурсов, запасов и т.д.). Типизация и отражение всех этих компонентов на карте позволят правильно прогнозировать возможности использования подземных вод.

Важнейшим критерием выделения и картографирования подмерзлотных вод (II гидрогеологический этаж) является структурно-геологический метод типизации гидрогеологических структур, использованный при составлении «Карты мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири» [4]. При картографировании надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод (I гидрогеологический

Перспективы использования подземных вод бассейна р. Лены (фрагмент таблицы)

Распространение водоносных комплексов, генезис		Мощность ММП*, м глубина залегания, ВК, м	Пьезометрический уровень, м удельный дебит, л/с·м	Минерализация, г/л	Преимущественный химический состав	Компоненты, превышающие ПДК	Пригодность использования подземных вод
ТУНГУССКИЙ АРТЕЗИАНСКИЙ БАСЕЙН							
Водоносный комплекс терригенно-карбонатных отложений ордовика и силура							
Верхневиллюйский криоартезианский бассейн П порядка	Подмерзлотные воды	200–400 180–274	 0,12	13,0–32,6	Cl Na	Cl, Na, М**	Слабо изучен, подмерзлотные воды соленые и соленоватые
	Источники межмерзлотных вод в долине р. Виллой и её притоков	200–400 Нет св.	 4–300 л/с***	0,4–0,6	НСО ₃ со смешанным катионным составом	Нет	Пригодны для ХПВ**** и ПТВ*****
Юрский водоносный комплекс							
Чонский артезианский бассейн		Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	В бассейне р. Лены не изучен
ЯКУТСКИЙ АРТЕЗИАНСКИЙ БАСЕЙН							
Лено-Виллюйский и Лено-Амгинский артезианские бассейны П порядка							
Водоносный комплекс аллювиальных отложений							
Северный склон Якутского выступа, несквозной подрусловой талик Адамовской и Городской проток, о. Хатыстах. Надмерзлотные воды.		0,0–3,5 0,0–35,5	0,0–4,4 0,02–0,26	0,47–0,62	НСО ₃ Mg-Ca, в районе г. Якутска НСО ₃ Na	Нет	Пригодны для ХПВ и ПТВ
Нерасчлененный нижне-верхнемеловой водоносный комплекс							
Предверхоанский краевой прогиб (Лено-Алданское междуречье, долина р. Лены). Подмерзлотные воды.		350–478 350–478	112–149 0,1–2,6	0,3–0,5	Cl-НСО ₃ Na	Fe ³⁺	Пригодны после очистки

Примечание. * ММП – многолетнемерзлые породы; **4–300 л/с – дебиты источников; ***М – минерализация; ****ХПВ – хозяйственно-питьевое водоснабжение; *****ПТВ – производственно-техническое водоснабжение.

этаж) важное значение имеет учет палеогео-криологических условий. Как известно, характерной чертой климата Северного полушария в четвертичный период является чередование циклов потепления и похолодания. В периоды потепления климата увеличивается мощность деятельного слоя крилитонозы, что приводит к образованию водоносных таликовых зон субаэрального типа, повышению их площади, мощности и водоемкости. В периоды похолоданий климата происходит сокращение сформировавшихся надмерзлотных водоносных горизонтов, переход их в разновидность межмерзлотных вод, а в дальнейшем и полное промерзание. На территории бассейна р. Лены в настоящее время сохранились локальные таликовые водоносные зоны субаэрального типа, сформировавшиеся в голоценовый климатический оптимум (5–6 тыс. лет назад). Содержащиеся в них над- и межмерзлотные воды могут обладать значительными ресурсами и высоким питьевым качеством [5].

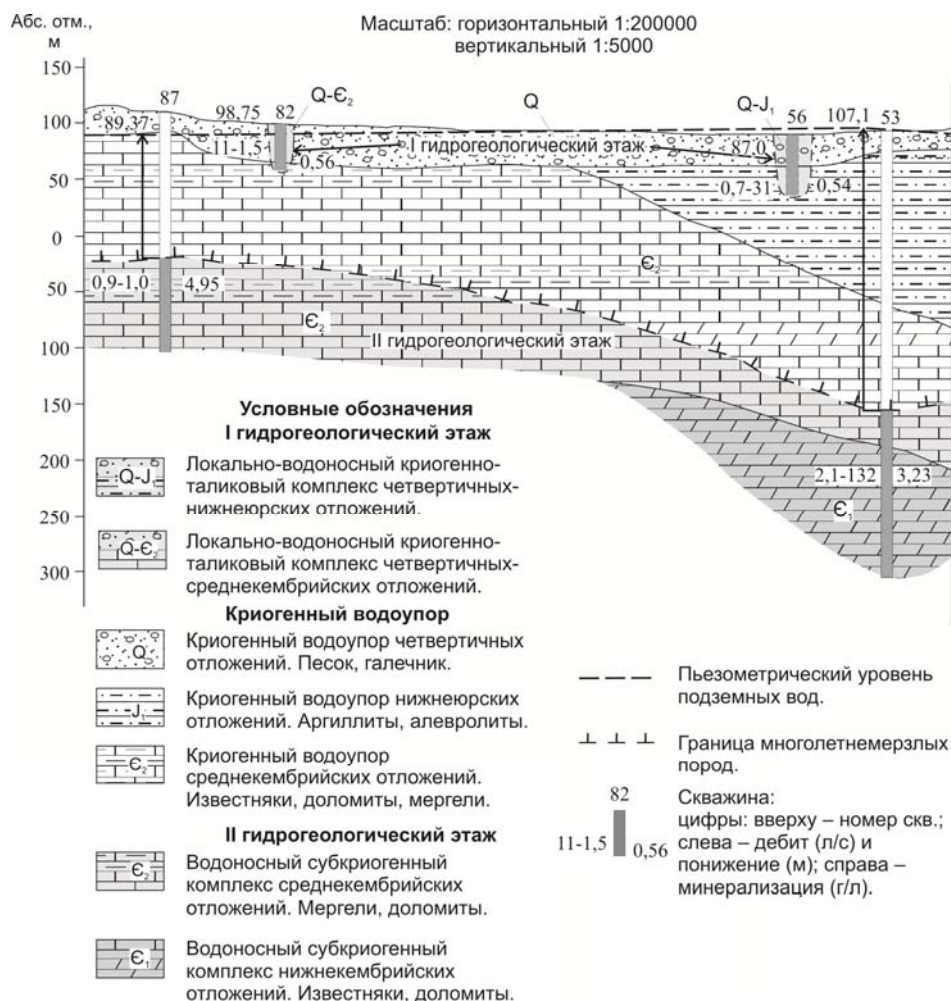
На первом этапе работ по составлению карты районирования предусматривается создание базы геоданных по перспективам использования

подземных вод для питьевого и технического водоснабжения (таблица). Структура и содержание базы данных должны соответствовать основной задаче: как можно полнее отразить накопленную информацию о подземных водах бассейна р. Лены. Второй этап работ предполагает сбор и анализ данных о минерально-сырьевых ресурсах подземных вод исследуемой территории. Далее формируется тематический слой «Районирование бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод для водоснабжения», который включает воды I и II гидрогеологических этажей (рисунок).

I гидрогеологический этаж содержит локально-водоносные криогенно-таликовые горизонты зоны свободного водообмена с минерализацией до 1 г/л и 1–10 г/л:

- поровые надмерзлотные воды песчаных и песчано-галечных отложений подрусловых таликов (Q);
- поровые, порово-пластовые надмерзлотные воды в песчаных и песчано-галечных отложениях подозерных таликов (Q, K);
- поровые и порово-пластовые надмерзлотно-межмерзлотные воды речных долин в песча-

О МЕТОДИКЕ РАЙОНИРОВАНИЯ БАССЕЙНА р. ЛЕНЫ ПО ПЕРСПЕКТИВАМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ



Обобщенный мерзлотно-гидрогеологический разрез с примером гидрогеологической стратификации (по материалам ГУГГП РС(Я) «Якутскгеология» и Института мерзлотоведения СО РАН)

ных и песчано-галечных отложениях (Q), в песчаниках и сланцах (K, J, T);

- поровые надмерзлотно-межмерзлотные воды песчаных террас и тукуланов (Q);
- поровые, порово-пластовые воды в песчаных и песчано-галечных отложениях подозерных таликов (Q, K, J), имеющих гидравлическую связь с трещинно-пластовыми и карстово-пластовыми подмерзлотно-талыми водами (J, T, E).

II гидрогеологический этаж включает:

- трещинно-пластовые подмерзлотно-талые воды в песчаниках и сланцах (K, T) с минерализацией до 1 г/л;
- трещинно-пластовые подмерзлотно-талые воды в песчаниках и сланцах (J) с минерализацией 1–10 г/л;
- карстово-пластовые и карстово-жильные подмерзлотно-талые воды в карбонатных породах (O) с минерализацией до 1 г/л;
- трещинно-жильные подмерзлотно-талые воды в

кристаллических и метаморфических породах (AR, PR) с минерализацией до 1 г/л;

- трещинно-пластовые и карстово-пластовые подмерзлотно-талые воды в терригенных и карбонатных породах (O, S, E), содержащие воды пестрой минерализации (от пресных до соленых).

В целях районирования бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод для водоснабжения предполагается выделить следующих районов:

- 1) перспективных (пресные подземные воды с минерализацией менее 1 г/л);
- 2) ограниченно перспективных (солончатые подземные воды с минерализацией 1–10 г/л и пестрым химическим составом);
- 3) малоперспективных (соленые подземные воды с минерализацией 10–50 г/л);
- 4) бесперспективных (рассолы с минерализацией более 50 г/л, а также районы, где подземные воды практически отсутствуют в жидкой фазе).

Обсуждение предлагаемой методики

Предварительное описание вышеперечисленных районов приводится ниже.

При районировании территории бассейна р. Лены по использованию подземных вод для целей водоснабжения к перспективным отнесены районы, где водоносные горизонты хорошо выдержаны по площади, а содержащиеся в них гидроминеральные ресурсы могут быть использованы в питьевых целях в природном качестве или с небольшой водоподготовкой. К таким районам могут быть отнесены некоторые площади Лено-Вилуйского, часть Лено-Амгинского артезианских бассейнов и Алданский гидрогеологический массив с наложенными адартезианскими структурами. В настоящее время

подрусловые надмерзлотные грунтовые воды успешно эксплуатируются в городах и поселках республики (Даркылахский водозабор в г. Якутске, Кангаласский групповой водозабор, одиночные водозаборные скважины в п. Едейцы в Намском районе, в г. Вилюйске и др.).

Перспективными для водоснабжения являются межмерзлотные воды субэдральных таликов средневысотных надпойменных террас рек Лены и Вилюя. Такие подземные воды разведаны на правобережной бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии. Водоносные горизонты приурочены здесь к контакту четвертичных песчаных отложений и кембрийских известняков. Межмерзлотные подземные воды, расфасованные в емкости, применяются для питьевых целей. В п. Кысыл-Сыр межмерзлотные воды подруслового талика р. Вилюя используются как производственно-технические для коммунального и газопромыслового хозяйства. При использовании их для питьевого водоснабжения необходимо применение существующих методов очистки воды.

Подмерзлотные пресные воды верхнемеловых отложений в Намском, Усть-Алданском и Кобяйском районах используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения п. Сангар и технического в селах Борогонцы и Намцы. В воде отмечено содержание фтора до 2 мг/л, что несколько превышает нормы для питьевой воды (1,5 мг/л).

Подмерзлотные водоносные горизонты в песчаниках и сланцах юрского возраста эксплуатируются, в основном, для производственно-технических целей, так как содержащиеся в них подземные воды имеют повышенную минерализацию (от 1,1 до 1,7 г/л), высокое содержание фтора (от 4,6 до 15,5 мг/л) и лития (до 0,89 мг/л при норме 0,03 мг/л), что требует соответствующей подготовки при использовании их в качестве питьевых. Наиболее крупными потребителями подмерзлотных вод этого горизонта являются г. Якутск и его пригородные поселки. Здесь действуют несколько групповых водозаборов и около 20 одиночных водозаборных скважин, вода которых используется в основном для технического водоснабжения. Водозаборные скважины действуют также в Мегино-Кангаласском и Таттинском районах. Использование этих вод для питьевых целей возможно при условии их предварительной очистки.

Успешно эксплуатируется подмерзлотный комплекс нижней юры и верхнего кембрия. Из-за повышенной минерализации и присутствия в воде фтора до 6,6 мг/л он используется, в основном, для производственно-технического водоснабжения и в редких случаях для хозяй-

ственно-питьевого. После приведения концентрации некоторых компонентов до регламентируемых СанПиНом 2.1.4.1074–01 [6] открываются перспективы более широкого использования этих вод для питьевых целей. В настоящее время на нескольких водозаборах в г. Якутске, эксплуатирующих нижнеюрский-среднекембрийский водоносный комплекс, установлены мембранные системы очистки воды.

Большими запасами обладают водоносные комплексы кембрийских и верхнепротерозойских (юдомская свита) отложений. Подмерзлотные воды в карстовых карбонатных породах вскрыты разведочными скважинами для водоснабжения объектов железной дороги Беркакит – Якутск. Пресные подземные воды хорошего качества выявлены в долине р. Амги (верховье) и на водоразделе рек Амга–Алдан. О значительных запасах свидетельствует и мощная зона разгрузки пресных подземных вод, протяженностью около 130 км, по левому борту долины р. Амги, с суммарным дебитом 1,43 м³/с [7].

К перспективным относится территория Южной Якутии, где развиты преимущественно ультрапресные и пресные подземные воды с минерализацией до 0,5 г/дм³. Подмерзлотные воды в кристаллических и метаморфических породах архея и протерозоя широко используются в Южно-Якутском горнопромышленном регионе. В Алданском и Нерюнгринском районах все водоснабжение базируется на использовании подземных вод. По основным показателям подземные воды соответствуют требованиям СанПиН 2.1.4.1074–01. Однако в некоторых скважинах наблюдается ухудшение качества воды по микробиологическим показателям (поселки Беркакит, Нижний Куранах, города Томмот, Алдан, Нерюнгри), что требует применения установок по обеззараживанию воды.

К ограниченно перспективным районам относится юго-западная часть Якутии. Здесь развиты водоносные комплексы закарстованных карбонатных отложений ордовика, совместное использование которых с водами четвертичных отложений обеспечивает водой население Ленского района. Групповые водозаборы и одиночные скважины сосредоточены, в основном, в г. Ленске, а также в поселках Витим, Пеледуй, Талакан. Всего эксплуатируется 25 водозаборов [8]. Однако, несмотря на широкое развитие пресных подземных вод и их использование, здесь могут быть встречены и соленосные отложения. При растворении они значительно изменяют химический состав и минерализацию подземных вод. Наряду с пресными гидрокарбонатными водами здесь развиты соленые с минерализацией от 10 до 35 г/л сульфатного и

хлоридного состава. Пресные подземные воды используются для хозяйственно-питьевых целей, а соленоватые – на обеспечение производственных нужд.

Районы с ограниченными перспективами использования подземных вод охватывают территорию бассейнов правых притоков р. Лены в пределах Южно-Верхоянского и Западно-Верхоянского гидрогеологических массивов (ГГМ). В Южно-Верхоянском ГГМ для водоснабжения могут быть использованы надмерзлотные и межмерзлотные грунтовые воды подрусловых и пойменных таликов речных долин, приуроченные к песчано-галечным отложениям четвертичного возраста и верхней трещиноватой зоне подстилающих коренных пород. Запасы их зависят от мощности рыхлых отложений, площади водосбора реки и тектонической нарушенности пород. В долинах крупных рек частично перемерзающие водоносные талики восполняют свои ресурсы за счет надмерзлотных и более глубоких подмерзлотных вод при сквозном характере талика. Здесь существуют перспективные возможности для использования подземных вод, т.к. на данной территории широко развиты карстующиеся карбонатные породы. Поисковым признаком на надмерзлотные и межмерзлотные воды могут служить наледи в долинах рек. Скважины, пробуренные в рыхлых отложениях до глубины 75–100 м, могут иметь дебит более 10 м³/ч. Однако зимой производительность скважин будет снижаться за счет сработки естественных запасов в критический период [9]. Качество этих вод, как правило, соответствует нормам питьевого водоснабжения. Воды подрусловых таликов рек Юдомы, Аллах-Юнь и др. используются для водоснабжения рабочих поселков. На подрусловых таликовых водах работает водозабор в п. Нежданинское Томпонского района. Подмерзлотные воды Южно-Верхоянского ГГМ изучены слабо и в основном разведаны за пределами рассматриваемой территории, где используются для питьевого водоснабжения.

На территории Западно-Верхоянского ГГМ в связи с большой мощностью ММП и расчлененностью рельефа подземные воды практически не изучены. Небольшие запасы пресных подземных вод могут быть сосредоточены в придолинных зонах и зонах тектонического нарушения горных пород, где мощность ММП сокращается. Здесь возможно использование трещинных и трещинно-жильных подземных вод. Наиболее водообильными будут скважины, которые закладываются в местах пересечения речных долин зонами тектонических разломов.

Малоперспективные районы в пределах бас-

сейна р. Лены охватывают в основном северную и западную части Якутии. В мерзлотно-гидрогеологическом отношении [1] они выделены в структуры криоартезианских бассейнов (Нижне-Ленский, Верхне-Вилуйский и Средне-Вилуйский). Здесь некоторый интерес могут представлять пресные надмерзлотные воды таликов речных долин и межмерзлотные воды зон повышенной тектонической трещиноватости. Подмерзлотные воды соленые и рассолы с минерализацией до 150 г/л для питьевого водоснабжения не пригодны.

К бесперспективным районам относятся криогеологические массивы и криогеологические бассейны. Так, на водораздельной части Буотамо-Амгинского междуречья выделен Буотамо-Амгинский криогеологический бассейн [10]. Чехол бассейна в зоне трещиноватости проморожен до глубины фундамента (880 м) и не содержит подземных вод в жидкой фазе.

Заключение

Изложенная методика районирования бассейна р. Лены по перспективам использования подземных вод для питьевого и технического водоснабжения позволяет учитывать дискретность и изменчивость во времени мерзлотно-гидрогеологической обстановки данной территории, а также появление новой гидрогеологической информации в процессе дальнейшего изучения подземных вод различного типа.

База данных районирования подземных вод может быть применена как по ее прямому назначению – для выявления перспектив использования подземных вод, так и для формирования новых классов пространственных объектов при внесении дополнительных данных, которые не отражаются на основной карте. Путем выполнения модельных исследований возможно в последующем создание новых тематических пространственных объектов, включая трехмерное моделирование, качественную и количественную оценку питьевых подземных вод в отдельно взятом районе территории бассейна р. Лены.

Литература

1. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелев, О.Н. Толстухин, В.М. Пигузова и др. – Новосибирск: Наука, 1984. – 192 с.
2. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. – 279 с.
3. Боровский Б.В., Грабовников В.А. Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке экс-

платационных запасов подземных вод. Мифы и реальность // Разведка и охрана недр. – 2010. – №10. – С. 3–8.

4. *Карта мерзлотно-геологического районирования Восточной Сибири.* Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. П. И. Мельникова. – М.: ГУГК, 1984. – 4 печ. л.

5. *Шепелев В.В.* Надмерзлотные воды криолитозоны. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. – 169 с.

6. *СанПиН 2.1.4.1074–01.* Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – М.: Информационно-издательский центр Госсанэпиднадзора России, 2001.

7. *Мониторинг* подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. –

Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 172 с.

8. *Государственный доклад* о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2012 году / Правительство Республики Саха (Якутия); М-во охраны природы Республики Саха (Якутия). – Якутск: Дани-Алмас, 2013. – 262 с.

9. *Дмитриев Е.М., Толстихин О.Н.* Использование подземных вод Якутской АССР для водоснабжения (перспективы, разведка, эксплуатация). – Якутск: Изд-во ЯТГУ, 1971. – 74 с.

10. *Иванова Л.Д., Никитина Н.М.* Об уточнении схемы мерзлотно-геологического районирования в южной части Якутского артезианского бассейна // Криосфера Земли. – 2000. – №2. – С. 52–56.

Поступила в редакцию 14.11.2014

УДК 551.89

Роль ледников в преобразовании рельефа Лено-Амгинской равнины в плейстоцене и голоцене

В.В. Спектор, В.Б. Спектор, Н.Т. Бакулина*, М.И. Парфёнов

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

**Государственное унитарное горно-геологическое предприятие «Якутскгеология», г. Якутск*

Рассматриваются условия формирования рельефа и четвертичных отложений, слагающих высокую Лено-Амгинскую равнину. Отмечается, что мощные (до 100 м) криолитогенные комплексы равнины накапливались синхронно с эпохами оледенений, а перерывы в осадконакоплении проявлялись в межледниковья. Формирование мощных толщ криолитогенных четвертичных отложений, вероятно, происходило в результате гляциоизостатического прогибания под влиянием ледниковой нагрузки. Подъем территории равнины и перерывы в осадкообразовании, возможно, обязаны снятию нагрузки на литосферу со стороны ледника, занимавшего Верхоянские горы и предгорную флювиогляциальную равнину.

Ключевые слова: рельеф, осадочные комплексы, четвертичные отложения, ледниковые периоды, межледниковья, Лено-Амгинская равнина.

The present paper examines past relief-forming conditions on the high Leno-Amga Rivers Plain underlain by Quaternary sediments. Thick (up to 100 m) sedimentary complexes of the plain were accumulated synchronously to glacials while breaks in the sedimentation took place during interglacials. Deposition of the thick Quaternary strata had likely occurred as a result of downwarp due to increase of glacial load. The uplift of the plain as well as the breaks in the sedimentation are probably caused by glacioisostatic movements during unloading of glacier which occupied the piedmont of the Verkhoyansk mountains.

Key words: relief, sedimentary complexes, Quaternary sediments, glacials, interglacials, Leno-Amga Plain.

Введение

Лено-Амгинская равнина относится к особой разновидности равнинных территорий – высоким равнинам. Они образуют на территории Сибирской платформы прерывистый пояс поверхностей с абсолютными высотами от 100 до 400 м, протягивающийся вдоль долины средне-

СПЕКТОР Валентин Владимирович – к.г.н., зав. лаб., vvspector@mpi.ysn.ru; СПЕКТОР Владимир Борисович – д.г.-м.н., г.н.с., vbspector@mpi.ysn.ru; *БАКУЛИНА Надежда Тимофеевна – зав. группой, ntbakulina@mail.ru; ПАРФЁНОВ Михаил Иванович – н.с., parfyonov@gmail.com.

платационных запасов подземных вод. Мифы и реальность // Разведка и охрана недр. – 2010. – №10. – С. 3–8.

4. *Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири.* Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. П. И. Мельникова. – М.: ГУГК, 1984. – 4 печ. л.

5. *Шепелев В.В.* Надмерзлотные воды криолитозоны. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. – 169 с.

6. *СанПиН 2.1.4.1074–01.* Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – М.: Информационно-издательский центр Госсанэпиднадзора России, 2001.

7. *Мониторинг* подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. –

Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 172 с.

8. *Государственный доклад* о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2012 году / Правительство Республики Саха (Якутия); М-во охраны природы Республики Саха (Якутия). – Якутск: Дани-Алмас, 2013. – 262 с.

9. *Дмитриев Е.М., Толстихин О.Н.* Использование подземных вод Якутской АССР для водоснабжения (перспективы, разведка, эксплуатация). – Якутск: Изд-во ЯТГУ, 1971. – 74 с.

10. *Иванова Л.Д., Никитина Н.М.* Об уточнении схемы мерзлотно-гидрогеологического районирования в южной части Якутского артезианского бассейна // Криосфера Земли. – 2000. – №2. – С. 52–56.

Поступила в редакцию 14.11.2014

УДК 551.89

Роль ледников в преобразовании рельефа Лено-Амгинской равнины в плейстоцене и голоцене

В.В. Спектор, В.Б. Спектор, Н.Т. Бакулина*, М.И. Парфёнов

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

**Государственное унитарное горно-геологическое предприятие «Якутскгеология», г. Якутск*

Рассматриваются условия формирования рельефа и четвертичных отложений, слагающих высокую Лено-Амгинскую равнину. Отмечается, что мощные (до 100 м) криолитогенные комплексы равнины накапливались синхронно с эпохами оледенений, а перерывы в осадконакоплении проявлялись в межледниковья. Формирование мощных толщ криолитогенных четвертичных отложений, вероятно, происходило в результате гляциоизостатического прогибания под влиянием ледниковой нагрузки. Подъем территории равнины и перерывы в осадкообразовании, возможно, обязаны снятию нагрузки на литосферу со стороны ледника, занимавшего Верхоянские горы и предгорную флювиогляциальную равнину.

Ключевые слова: рельеф, осадочные комплексы, четвертичные отложения, ледниковые периоды, межледниковья, Лено-Амгинская равнина.

The present paper examines past relief-forming conditions on the high Leno-Amga Rivers Plain underlain by Quaternary sediments. Thick (up to 100 m) sedimentary complexes of the plain were accumulated synchronously to glacials while breaks in the sedimentation took place during interglacials. Deposition of the thick Quaternary strata had likely occurred as a result of downwarp due to increase of glacial load. The uplift of the plain as well as the breaks in the sedimentation are probably caused by glacioisostatic movements during unloading of glacier which occupied the piedmont of the Verkhoyansk mountains.

Key words: relief, sedimentary complexes, Quaternary sediments, glacials, interglacials, Leno-Amga Plain.

Введение

Лено-Амгинская равнина относится к особой разновидности равнинных территорий – высоким равнинам. Они образуют на территории Сибирской платформы прерывистый пояс поверхностей с абсолютными высотами от 100 до 400 м, протягивающийся вдоль долины средне-

СПЕКТОР Валентин Владимирович – к.г.н., зав. лаб., vvspector@mpi.ysn.ru; СПЕКТОР Владимир Борисович – д.г.-м.н., г.н.с., vbspector@mpi.ysn.ru; *БАКУЛИНА Надежда Тимофеевна – зав. группой, ntbakulina@mail.ru; ПАРФЁНОВ Михаил Иванович – н.с., parfyonov@gmail.com.

го течения р. Лены в ее низовья. В формировании покровов этих поверхностей и развитых на них форм, а также высотного положения уровней решающую роль сыграла климатическая составляющая рельефообразующих процессов, которая отражена в чередовании ледниковых и межледниковых эпох.

Лено-Амгинская равнина охватывает междуречье Лены, Алдана и Амги и имеет форму треугольника. Острый угол ее глубоко вдается в область Приленского плато (рис. 1, 2). С запа-

Рис. 1. Геоморфологическая карта междуречья Лены и Амги и смежных территорий (составитель Спектор В.В.): 1 – Верхоянская горная страна; 2 – Приленское столовое плато; 3–7 – Лено-Амгинская высокая равнина: 3 – озерно-аллювиальная подпрудная перигляциальная равнина (ледниковые эпохи среднего неоплейстоцена, мавринская свита), 4 – аллювиальная равнина (теплая эпоха в начале среднего неоплейстоцена, тобольское потепление, бестяхская свита), 5 – аллювиально-подпрудная перигляциальная равнина, созданная спиллвеями (рубеж позднего неоплейстоцена и голоцена, дюлкунинская свита), 6 – озерно-подпрудная перигляциальная равнина (озерные, середина позднего неоплейстоцена, ледниковая эпоха), 7 – наклонная аккумулятивная полигенетическая равнина (ледовый комплекс, середина и конец позднего плейстоцена, дегляциация и подъем); 8–9 – Приверхоянская наклонная ледниковая равнина: 8 – флювиогляциальные шлейфы, 9а – неразделенные флювиогляциальные и конечно-моренные отложения, 9б – конечно-моренные отложения; 10 – ступени в рельефе, вероятно, гляциоизостатического происхождения; 11 – линия геолого-геоморфологического разреза, отраженного на рис. 2

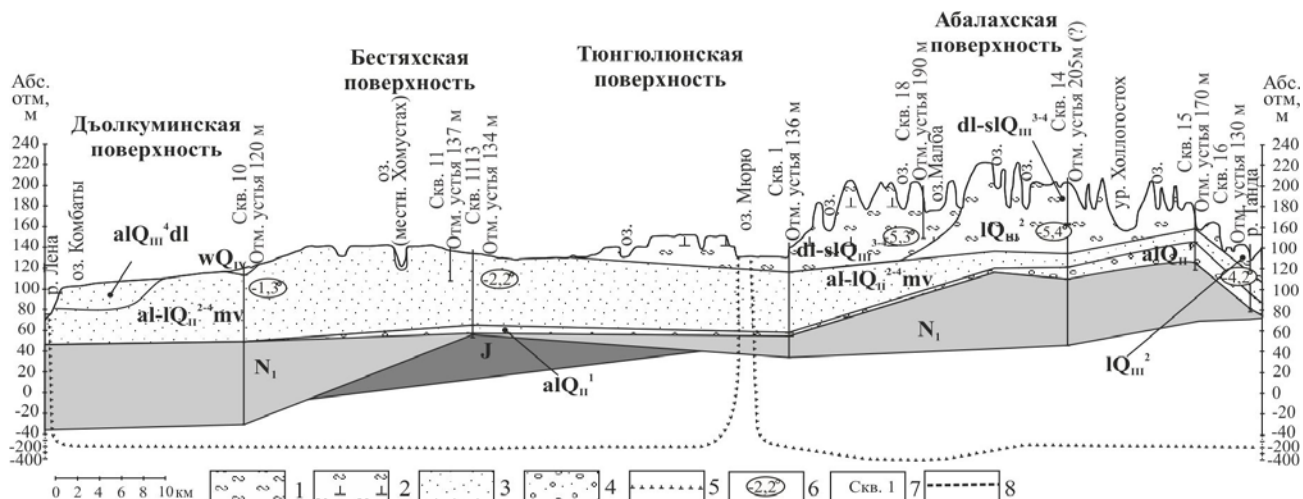
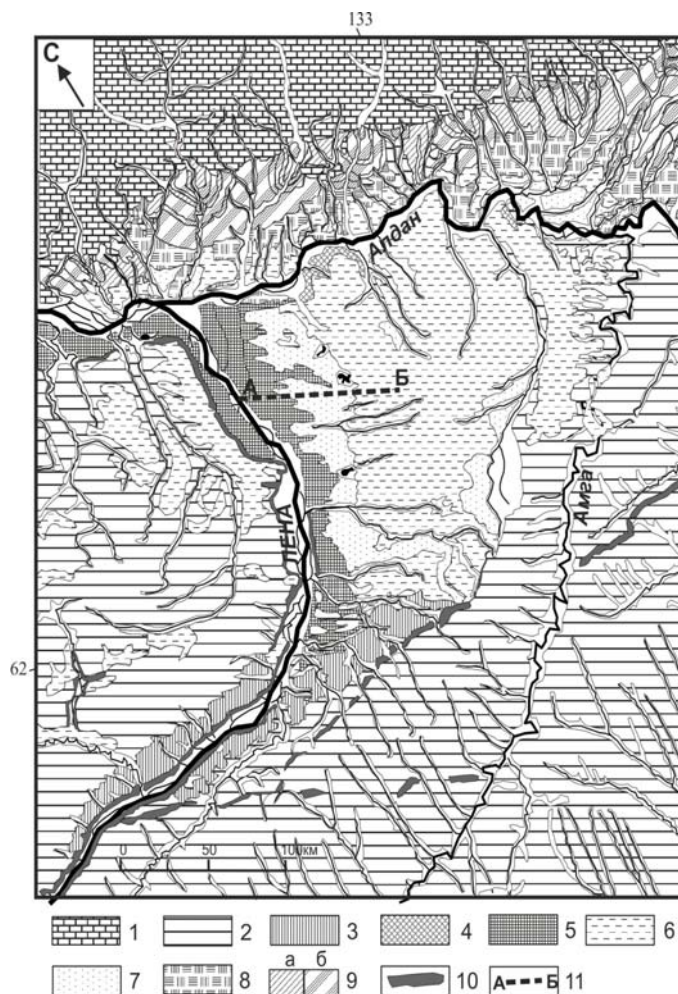


Рис. 2. Геолого-геоморфологический (водораздельный) разрез Лено-Амгинской равнины по линии А–Б (см. рис. 1, Спектор, 2003): 1 – суглинки; 2 – суглинки с повторно-жильными льдами; 3 – пески; 4 – галечник; 5 – нижняя граница многолетнемерзлых пород (Иванов, 1984); 6 – температура многолетнемерзлых пород на глубине нулевых годовых амплитуд (Иванов, 1984); 7 – гидрогеологические скважины (материалы Госгеолкома РС(Я), Щеглов и др., 1970); 8 – линия разреза на географической схеме.

Возраст и состав толщ: wQ_{IV} – голоцен, эоловые пески; alQ_{III}^{4dl} – сартанский горизонт, дюлкунинская свита, аллювиальные пески; $dl-slQ_{III}^{3-4}$ – каргинский и сартанский горизонты, делювиально-солифлюкционные суглинки с повторно-жильными льдами; IQ_{III}^2 – раннезырянский горизонт, озерные и озерно-болотные суглинки, алевроиты, илы; $al-IQ_{III}^{2-4}mv$ – самаровский, ширтинский, тазовский горизонты, мавринская свита, аллювиально-подпрудные пески; alQ_{III}^1 – тобольский горизонт, аллювиальные галечники и пески; N_1 – миоценовые отложения, пески; J – юрские отложения, пески

да, востока и юга эта обособленная высокая равнина граничит с Приленским плато, а на северо-востоке – с наклонной Приверхоянской флювиогляциальной равниной. Площадь Лено-Амгинской равнины около 46 тыс. км². На поверхности равнины можно выделить несколько террасовидных поверхностей: дирингскую на границе Лено-Амгинской равнины и Приленского плато (280–450 м), абалахскую (260–280 м), тюнгулюнскую (160–200 м), бестяхскую (120–170 м), дьолкуминскую (100–120 м), кердемскую (выступает в роли второй надпойменной террасы, 90–110 м) и современные террасы – пойма и первая надпойменная (85–100 м) [1].

Большая часть из перечисленных террасовидных поверхностей перекрывается прерывистым покровом ледового комплекса, представляющего собой толщу криолитогенных льдистых суглинков с мощными и протяженными телами повторно-жильных льдов. Перечисленные уровни (кроме речных террас) образуют полого-наклонные площадки шириной десятки километров, которые ступенчато опускаются к востоку, к долине р. Лены, и в северной части на значительном протяжении подрезаются р. Алданом.

В настоящее время имеются несколько гипотез о происхождении криолитогенных покровов и геоморфологических уровней высоких аккумулятивных равнин рассматриваемой территории: паводковая («непрерывно-поемная»), эрозивно-аккумулятивная, ледниково-подпрудная, золовая и аллювиально-пролювиальная. В предлагаемой статье поддерживается ледниково-подпрудная гипотеза, но подчеркивается роль тектонического (гляциоизостатического) фактора.

В течение последних лет были уточнены климатические условия формирования основных четвертичных осадочных комплексов равнины [2, 3] и проведена климатостратиграфическая корреляция с ледниковыми отложениями Верхоянья.

Осадочные криолитогенные комплексы Лено-Амгинской равнины

В строении Лено-Амгинской равнины участвуют следующие основные литолого-генетические (криолитогенные) комплексы [4] (рис. 3): 1) плиоцен-раннеплейстоценовый комплекс «исходной поверхности»; 2) среднеплейстоценовый песчано-галечный, базальный; 3) среднеплейстоценовый, песчаный; 4) позднеплейстоценовый алевритовый, озерный; 5) каргинско-сартанский, ледовый и 6) голоценовый, аллювиальный. Осадочные комплексы разделены крупными перерывами.

Плиоцен-раннеплейстоценовый комплекс «исходной поверхности», слагающий основание четвертичного разреза, вскрывается многими скважинами на Лено-Амгинском междуречье и в береговых обнажениях по рр. Лене, Алдану и некоторым глубоко врезанным их притокам.

Комплекс сложен преимущественно галечниками, реже песками, с пестрой по составу средней и мелкой галькой, среди которой преобладают окатанные обломки кремня, метаморфических и изверженных пород, реже кварца и карбонатов. Мощность комплекса составляет первые метры, редко более 10 м. Плиоцен-нижне-четвертичный возраст комплекса доказывается палеонтологическими находками в его обнажениях в нижнем течении р. Алдана [5, 6]. Характерной особенностью комплекса является преобладание материала дальнего переноса и отсутствие галек верхоянского терригенного комплекса даже вблизи Верхоянских гор. Это указывает на однонаправленный снос материала со стороны приподнятых участков Сибирской платформы и Байкало-Становой области. Комплекс формировался в условиях пенеппена, уровень которого принимается в качестве исходной поверхности, располагавшейся на уровне базиса денудации. По деформациям комплекса можно судить о масштабах четвертичных тектонических движений. На Приленском плато исходная поверхность комплекса приподнята до абсолютных высот 450 м, а на территории Лено-Амгинской равнины она опускается до высот 60 м и ниже.

Наличие холодных степных ландшафтов, устанавливаемых по комплексу фауны и палинологическим данным, косвенно свидетельствует о вероятном существовании на данной территории в плиоцен-нижнечетвертичное время многолетней мерзлоты. Среднегодовые температуры, вероятно, были несколько ниже современных. Не исключено, что именно к этому времени относятся псевдоморфозы морозобойных трещин, известные в местности Дириг-Юрях, несколько выше устья р. Буотамы (приток р. Лены). Песчаное выполнение криогенных форм датировано цифрой 366000 ± 2400 л. (OTL 472) [7], что соответствует тобольскому межледниковью.

Вышележащий разрез характеризуемого комплекса [8] представлен галечниками, содержащими артефакты (10 см), глинистой толщей (до 7 м), песками и суглинками охристой толщи (около 5 м). Последняя содержит песчаные жилы криогенного происхождения. Первичные криогенные текстуры за исключением песчаных жил в комплексе не сохранились. Песчаные жилы формируются при наличии многолетнемерз-

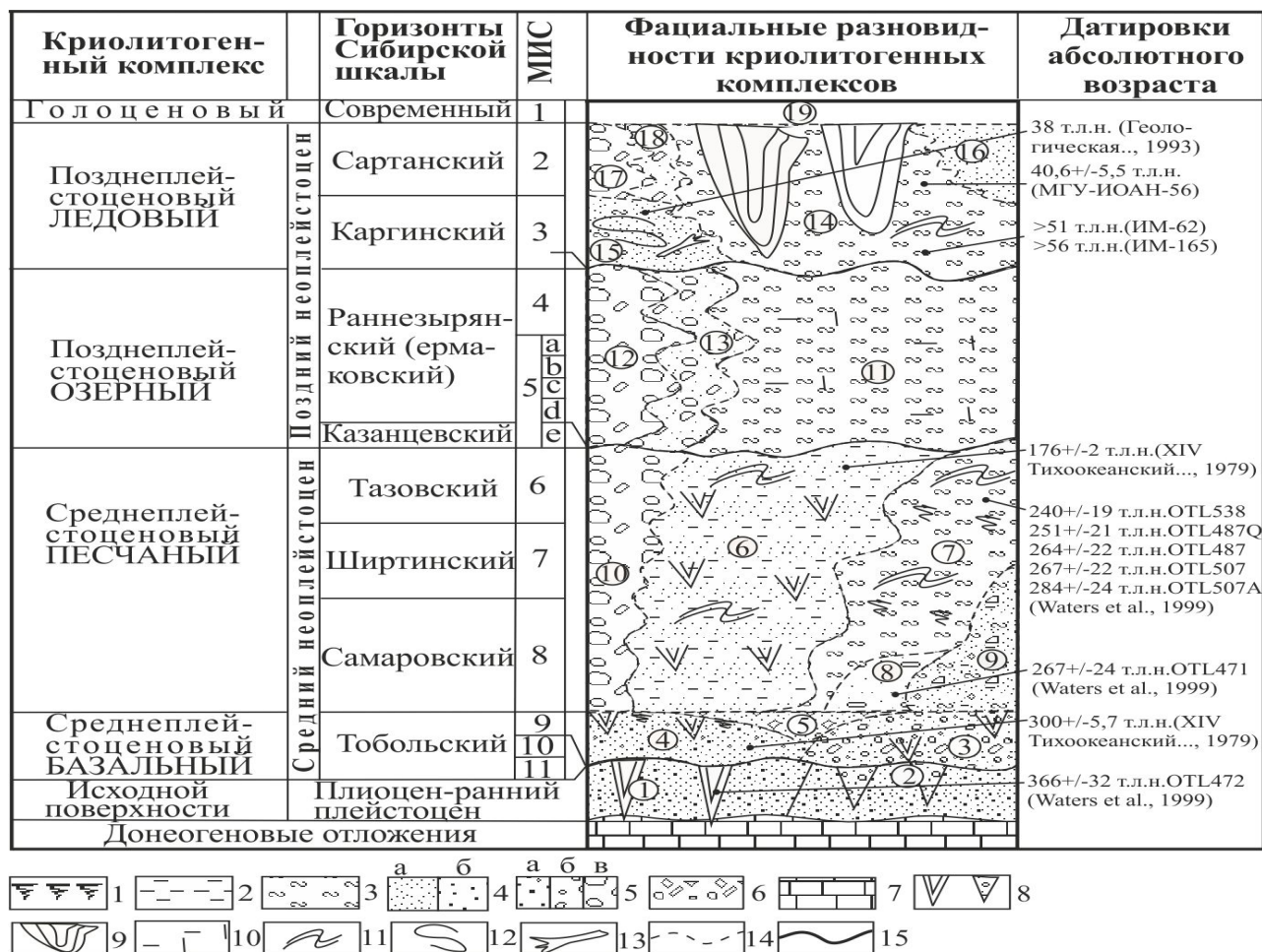


Рис. 3. Осадочные комплексы четвертичных отложений Лено-Амгинского междуречья: 1 – почвы; 2 – алевриты; 3 – суглинки; 4 – пески: а) мелко- и среднезернистые, б) крупнозернистые; 5 – гравий (а), галька (б) и валунник (в); 6 – щебень; 7 – известняки; 8 – земляные жилы отгибания, псевдоморфозы по повторно-жильным льдам; 9 – повторно-жильные льды; 10 – косые, решетчатые шпировые криотекстуры; 11 – криотурбации; 12 – оползневые гравитационные складки; 13 – обломки стволов деревьев; 14 – границы между фациями; 15 – перерывы в осадконакоплении, размыты. Цифрами в кружках обозначены фации осадочных отложений. Среднеплейстоценовый базальный криолито-генный комплекс: 1–2 – песчаное и гравийно-галечниковое выполнение жил, пересекающих подстилающие неогеновые толщи; 3 – русловой аллювий; 4 – косовой аллювий; 5 – делювиально-солифлюкционная фация. Среднеплейстоценовый песчаный криолито-генный комплекс: 6 – аллювиально-подпрудная фация; 7 – делювиально-солифлюкционные фации; 8 – эоловая фация; 9 – делювиальные фации; 10 – ледниковая фация. Позднеплейстоценовый озерный криолито-генный комплекс: 11 – озерные фации; 12 – ледниковая фация; 13 – флювиогляциальные фации. Позднеплейстоценовый ледовый криолито-генный комплекс: 14 – делювиально-солифлюкционные отложения с повторно-жильными льдами (ледовый комплекс); 15 – фация «грязевых потоков» с вертикально захороненными стволами деревьев; 16 – косовой аллювий; 17 – ледниковая фация; 18 – флювиогляциальная фация. Голоценовые отложения: 19 – неразделенные аллювиальная, озерная, делювиально-солифлюкционная, эоловая фации

лых пород, температуре пород $-6...-8^{\circ}\text{C}$, среднегодовой температуре приземного слоя воздуха $-12...-14^{\circ}\text{C}$. Наиболее вероятным временем формирования данного комплекса является период, охватывающий эоплейстоцен и ранний плейстоцен. В охристой толще обнаружены остатки мелких млекопитающих, характерных для раннего плейстоцена, в глинистой – насекомых, присущих для плейстоцена [8].

Среднеплейстоценовый песчано-галечный, базальный комплекс. Преобладание денудации в самом конце раннего – начале среднего плейс-

тоцена обязано тектонической активизации горных стран на периферии Сибирской платформы (Байкало-Становой и Верхоянской), происшедшей на фоне глобального падения уровня моря. Подъем на рубеже раннего и среднего плейстоцена подтверждается и среднеплейстоценовым врезом, который наблюдается в береговых обнажениях р. Лены, выше устья р. Буотамы.

Эпоху перерыва характеризуют связанные с ней отложения основания среднего плейстоцена – бестяхская свита и ее возрастные аналоги. Эта

толща имеет признаки перстративного аллювия: грубообломочный состав (грубозернистые гравийные пески, гравийники и галечники), косую, нередко диагональную слоистость, невыдержанность и прерывистость литофаций. Мощность этих осадков до 20 м. Характерные относительно «теплые» спорово-пыльцевые комплексы, отражающие растительный покров хвойно-мелколиственных (березово-ольховые и хвойные с участием елей) лесов, указывают на мягкую климатическую обстановку. Верхняя часть бестяхской свиты нередко рассечена узкими (до 20 см) песчаными жилами – псевдоморфозами по морозобойным трещинам, проникающими из вышележащего комплекса [9]. Перерыв и врез на этом рубеже обусловлены скорее тектонической фазой диастрофизма в смежных горных областях, а не климатическими причинами.

Среднеплейстоценовый песчаный комплекс характеризуется повсеместным распространением и складает протяженные и широкие (десятки километров) рельефообразующие поверхности вблизи современной долины р. Лены (бестяхская и диригская террасы). Мощность его достигает 100–120 м.

Подпрудно(?)-аллювиальные фации (маврinskая свита) являются наиболее представительными и характерными частями рассматриваемого комплекса. Эта разновидность комплекса с перерывом залегает на более древних слоях и сложена мелкозернистыми, горизонтально-, волнисто- и, реже, косослоистыми песками с прослоями песчанистых алевроитов. В толще отмечаются шлировые криогенные текстуры (в алевроитистых прослоях), множество криогенных нарушений слоистости и псевдоморфозы по мелким морозобойным трещинам, указывающих на сингенетичное промерзание и мелководность среды осадконакопления. По особенностям формирования пески свиты относятся к констративному аллювию, а алевроиты – к озерному. Мощность свиты достигает 100 м. Спорово-пыльцевые комплексы средней части свиты характеризуют обстановку лесотундр, а верхней и нижней – травяно-моховых тундр. В поле распространения свиты известны находки среднеплейстоценовой фауны – обитателей холодных степей, а в нижней части свиты установлены остатки пресноводной фауны [9].

Пойменные фации, относящиеся к самаровскому горизонту, представлены покровами уже упоминавшейся диригской террасы. Это глины, супеси и суглинки, первоначальное залегание которых нарушено более поздними склоновыми и криогенными процессами. Мощность толщ составляет 30–40 м, в них установлен хо-

лодный спорово-пыльцевой комплекс [8]. Самаровский возраст осадков подтвержден термолюминесцентными определениями абсолютного возраста [7]. В частности, в основании покровов получена дата 267 т.л., а выше по разрезу установлено 5 датировок в интервале 240–287 т.л., что укладывается в пределы МИС 8.

Меньшее распространение в составе комплекса имеют делювиальные фации, установленные в среднем течении р. Лены (огдокунская свита), и аллювиальные озерные образования (эльгинская свита) на 50-метровой террасе р. Алдана [9, 10].

Основные черты комплекса (относительная выдержанность состава, преимущественно водный генезис осадков, признаки мелководности и периодического осушения бассейна и промораживания осадков сверху и снизу, трансгрессивный характер отложений и пр.) указывают на то, что комплекс формировался в условиях прогибания территории, а отложение слоев происходило на уровне, близком к уровню компенсации. Палеогеографический анализ показывает, что территория Лено-Амгинской равнины в период накопления комплекса представляла собой мелководный, временами углубляющийся бассейн, с северо-запада и юга ограниченный уступами плато.

По аналогии с современными местами развития лесотундры средние температуры составляли:

$$t^{\circ}_I = -12^{\circ} \dots -14^{\circ} \text{C}, \\ t^{\circ}_{VII} = 6,0^{\circ} \dots 8,0^{\circ} \text{C}.$$

Устойчивое прогибание Лено-Амгинской равнины связано с гляциоизостатическим погружением всей перигляциальной области, расположенной к западу от ледников Верхоянских гор и их предгорий. Именно среднеплейстоценовые моренные образования пересекают долины рр. Лены и Алдана и наблюдаются на левых берегах этих рек

Перерыв между среднеплейстоценовым и верхнеплейстоценовым комплексами. Перерыв выражен резким фациальным переходом, приуроченным к границе вышележащего озерного комплекса, и повсеместным развитием на этой границе горизонта крупных (более 3 м) субвертикальных грунтовых жил. Нижний возрастной предел перерыва лимитируется датировкой абсолютного возраста озерного комплекса, вмещающего упомянутые грунтовые жилы на Мамонтовой Горе – 176000 л.н., а верхний – датировками вышележащей толщи озерных суглинков – более 56000 л.н. [11]. Таким образом, перерыв может приходиться на вторую половину МИС 6 и первую половину МИС 5, включая 5e и 5d. Формирование крупных жил

может быть связано с очень холодной эпохой 5d –117000–105000 л.н. [по 12].

Вероятно, этот перерыв имел место в период казанцевского межледниковья и был обязан гляциоизостатическому поднятию территорий, вовлеченных в среднеплейстоценовое гляциоизостатическое прогибание. К этим территориям, несомненно, относится и Лено-Амгинская равнина. Слои, отвечающие казанцевскому горизонту на Лено-Амгинской равнине и смежных с ней площадях, нигде не доказаны.

Позднеплейстоценовый озерный комплекс в настоящее время выходит на поверхность на самой высокой, приводораздельной части Лено-Амгинской равнины и некоторых высоких обнажениях в нижнем течении р. Алдана. Однако, несомненно, что в докаргинское время комплекс был распространен по всей территории Лено-Амгинской равнины (от Алдана до Лены) и в отдельные моменты отлагался и на левобережье р. Лены и правобережье р. Алдана.

Озерный комплекс сложен горизонтально-слоистыми сизовато-серыми и темно-серыми озерно-болотными алевроитами [1] с прослоями и линзами желтовато-серого мелкозернистого песка, скоплениями обломков древесины и растительного детрита мощностью до 0,3 м, а также включениями раковин пресноводных моллюсков – обитателей промерзающих до дна мелких водоемов. Отмечаются шлировые криогенные текстуры. Мощность его от 15–20 до 80–100 м. Возраст определяется по сопоставлению с фаунистически охарактеризованными озерными отложениями на 50 м террасовидной ступени в обнажении Мамонтова Гора. В основании озерных суглинков установлены остатки хвалынского фаунистического комплекса, относящегося к среднему и позднему плейстоцену [13], а в верхней части – позднеплейстоценовые – *Bison priscus longicornis*. Нижний возрастной предел начала накопления озерных суглинков – после казанцевского межледниковья, вероятно, совпадает с резким похолоданием, совпадающим с МИС 5d. Верхний возрастной предел, видимо, ограничивается временем каргинского межледниковья. По данным палинологического анализа в рассматриваемом районе реконструируется обстановка пояса тундр, где средние годовые температуры были на 6–8°C ниже современных для Центральной Якутии.

Сочетание суровой климатической обстановки с фактами широкого распространения озерных бассейнов указывает на восстановление системы подпрудных приледниковых бассейнов, аналогичных среднеплейстоценовым.

Еще более суровые климатические условия реконструированы по изотопно-кислородному

анализу фирнов, установленных в этих отложениях на Лено-Амгинском водоразделе на глубине около 15 м [2, 3]. Среднегодовая температура по этим данным составляет –25,3°C. Это ниже современной среднегодовой температуры г. Якутска на 15°C. С учетом характера растительности и сохранения фирнов даже в летние сезоны можно предполагать, что снижение среднегодовых температур происходило за счет падения летних температур, которые были близки к 0°C, а в отдельные годы и слабо отрицательными.

Перерыв на границе каргинской и зырянской эпох. На большей части территории полигенетический ледовый комплекс лежит с размывом на различных горизонтах озерных суглинков и подстилающих их отложениях. Разрыв фиксируется разновысотным положением нижней границы комплекса, выпадением подстилающих плейстоценовых комплексов, узкими и глубокими эрозионными ложбинами, выполненными разновозрастными частями рассматриваемого комплекса.

Установленный разрыв мог иметь место в самом начале каргинского климатического оптимума и был связан с деградацией ледников, расположенных к востоку от равнины, и гляциоизостатическими поднятиями ледниковой области и смежной с ней перигляциальной зоны.

Позднеплейстоценовый (каргинско-сартанский) полигенетический ледовый комплекс венчает разрез плейстоцена высокой равнины. Отложения, содержащие сингенетичные повторно-жильные льды (что и называют собственно «ледовым комплексом»), распространены на поверхности большей части рассматриваемой территории. Границы ледовых толщ с более древними озерными суглинками не всегда четкие. Аллювиально-пролювиальными процессами [14] можно объяснить то, что данный комплекс залегает на разных гипсометрических уровнях, нередко образует маломощные покровы на относительно низких террасах и содержит субаквальные фации. Мощность ледового комплекса достигает в пределах равнины 40–60 м [1]. В районе оз. Енер определен абсолютный возраст по нитевидным корешкам трав: в интервале глубин от 36 до 3 м получен ряд цифр от 22 до 13,6 т.л.н.

В ледовом комплексе на различных участках равнины найдено значительное количество костей мамонтового комплекса (поздний вариант) [5]. Здесь нередки кости, захороненные в анатомическом порядке. Практически непрерывное формирование на протяжении каргинско-сартанского времени полифациального ледового

комплекса, в котором в равных объемах представлены субквальные и пролювиальные фации, показывает, что на территории Лено-Амгинской равнины были распространены слабо дифференцированные вертикальные движения. Реконструкция температур этого времени была осуществлена на основании изотопно-кислородного анализа погребенных снежников. Среднегодовая температура составила $-24,2^{\circ}\text{C}$. Летние температуры были, вероятно, близки к 0°C , а зимние аналогичны современным.

Для рассматриваемых отложений характерно преобладание споровых над пыльной древесно-кустарниковых и травянисто-кустарниковых растений. Этот состав отражает преобладание растительности тундровых ландшафтов, где широкое распространение имели болотные формации. Климат рассматриваемой территории характеризовался высокой суровостью, очень холодной зимой, аналогичной современной, и холодным летом, с температурами самого теплого месяца, близкими к 0°C . Причиной относительной стабильности рельефа в это время является относительная стабильность ледникового режима смежной гляциальной области, выраженного в медленном пульсирующем сокращении площади ледников.

Голоценовый аллювиальный комплекс формирует пойму и первую надпойменную террасы, сложенные преимущественно песками. Между этим и более древними комплексами имеет место перерыв, сопровождаемый глубоким врезом (30–100 м) в бо-

лее древние осадки [15]. Врез, вероятно, был обусловлен быстрым гляциоизостатическим поднятием, связанным с почти полной деградацией ледников гляциальной Верхоянской области.

Фациальный анализ показывает (рис. 4), что формирование высокой Лено-Амгинской равнины происходило циклически.

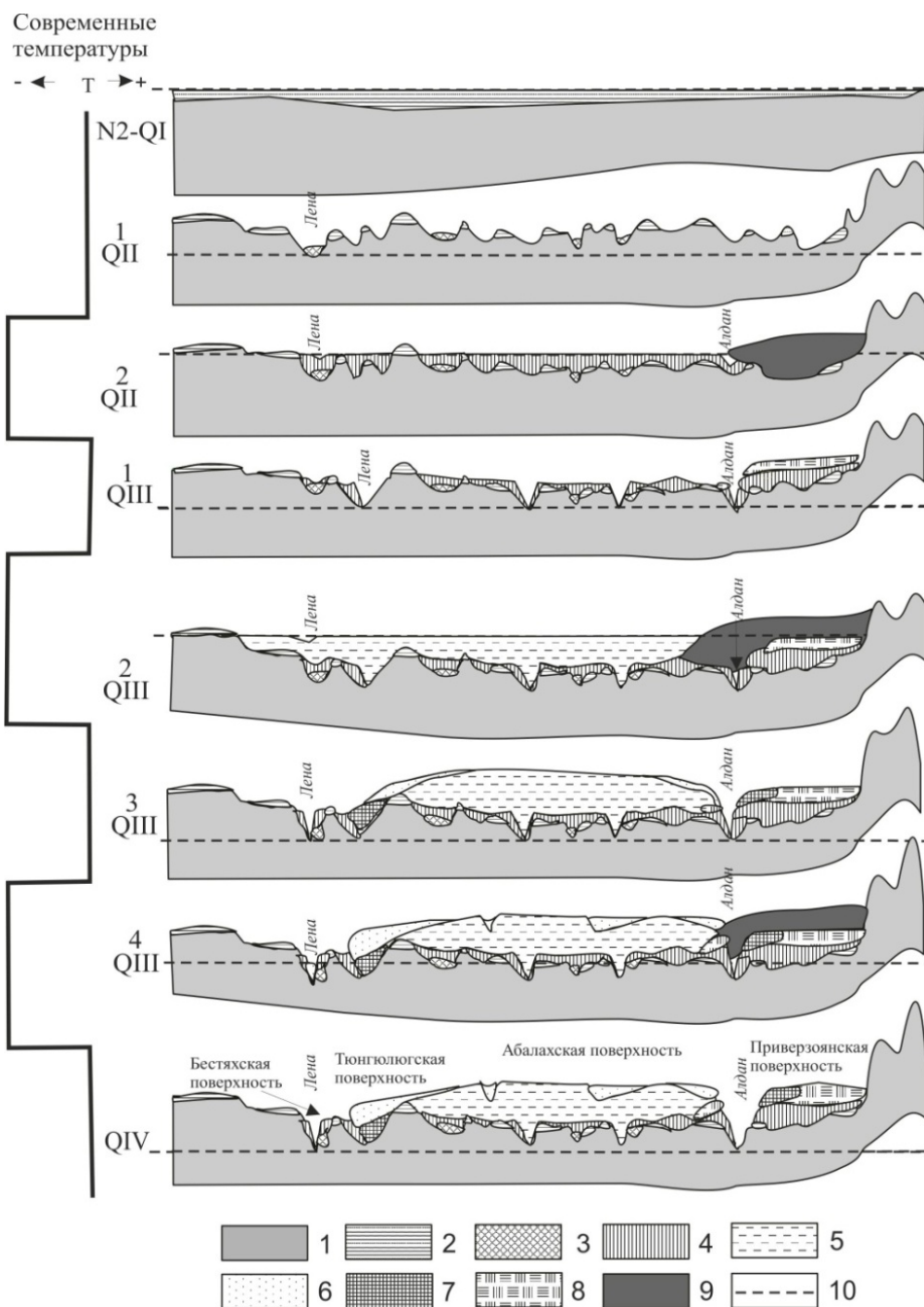


Рис. 4. Схема формирования криолитогенных комплексов и рельефа Лено-Амгинского междуречья в неоплейстоцене (составитель Спектор В.В.): 1 – дочетвертичные отложения; 2 – плиоцен-раннечетвертичные отложения; 3 – среднеплейстоценовый базальный криолитогенный комплекс; 4 – среднеплейстоценовый песчаный криолитогенный комплекс; 5 – позднелестоценовый озерный криолитогенный комплекс; 6 – позднелестоценовый ледовый криолитогенный комплекс; 7 – фация грязевых потоков; 8 – флювиогляциальные фации; 9 – ледники; 10 – базис эрозии

Заключение

Изложенные выше данные показывают, что в четвертичной истории Лено-Амгинской равнины отчетливо выделяются два цикла: среднеплейстоценовый и позднеплейстоценовый. В конце первого цикла высокая равнина исчезла, будучи отчасти денудированной, а затем и погруженной под воды озерного бассейна. Внутри циклов осадочные комплексы накапливались, главным образом, в ледниковые эпохи, а перерывы были приурочены к межледниковьям. Эти совпадения представляются не случайными, а свидетельствуют о глубокой связи режима осадконакопления Лено-Амгинской равнины с климатическими событиями, происходившими на территории Сибири в плейстоцене. Этот вывод подтверждается совпадением по времени и направленности тектонических событий на Лено-Амгинской равнине и вертикальных движений, вероятно гляциоизостатических, на флювиогляциальной равнине. И в том, и другом случаях отмечаются гляциоизостатический подъем в голоцене, замедление поднятий и осадконакопления в сартанское время, поднятие в начале каргинского времени и погружение в зырянское время. Для среднего плейстоцена в рассмотренном регионе эти совпадения не подтверждены прямыми наблюдениями, но в районе г. Жиганска известны среднеплейстоценовые морены, переходящие на левый берег р. Лены. Эти обстоятельства заставляют принять в качестве одной из наиболее вероятных причин образования высокой аккумулятивной равнины гляциоизостатическую гипотезу. При этом территория Лено-Амгинской равнины относилась к внешней (перигляциальной) части области оледенения, максимум которого располагался на территории Приверхоянской наклонной флювиогляциальной равнины.

Работа выполнена при поддержке партнерского интеграционного проекта № 9 «Сопоставление эволюции природной среды Сибири и Дальнего Востока по основным временным средам позднего кайнозоя».

Литература

1. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. – Новосибирск: Наука, 1984. – 125 с.
2. Спектор В.Б., Спектор В.В., Бакулина Н.Т. Погребенные снежники на Лено-Амгинской равнине // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV, №4. – С. 18–24.
3. Спектор В.Б., Дубинина Е.О., Спектор В.В., Бакулина Н.Т. Изотопный состав кислорода и водорода погребенных снежников на Лено-Амгинской равнине // Лед и снег. – 2013. – №3 (123). – С. 89–98.
4. Спектор В.В. Происхождение криолитогенных комплексов высокой равнины Лено-Амгинского междуречья: автореф. дис. ... к.географ.н. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2003. – 23 с.
5. Вангенгейм Э.А. Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогена Северной Азии (по млекопитающим). К X конгрессу INQUA (Бирмингем, 1977). – М.: Наука, 1977.
6. Вангенгейм Э.А., Векуа М.Л., Жегалло В.И. и др. Положение таманского фаунистического комплекса в стратиграфической и магнитохронологической шкалах // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1991. – № 60. – С. 41–52.
7. Waters M.R., Forman S.L., Pierson J.M., 1999. Late Quaternary Geology and Geochronology of Diring Yuriakh, An Early Paleolithic Site in Central Siberia. Quaternary Research 51 (2). – P.195–211.
8. Алексеев М.Н., Камалетдинов В.А., Зигерт Х. Проблемы палеолитического памятника Диринг-Юрях: препринт. – Якутск, 1990. – 48 с.
9. Камалетдинов В.А., Минюк П.С. Строение и характеристика отложений бестяхской террасы Средней Лены // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1991. – № 60. – С. 68–78.
10. Русанов Б.С. Биостратиграфия кайнозойских отложений Южной Якутии. – М.: Наука, 1968. – 459 с.
11. Баранова Ю.П. и др. XIV Тихоокеанский научный конгресс: неогеновые и плейстоценовые отложения Центральной Якутии: путеводитель XIII тура. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1979. – 73 с.
12. Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И. и др. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с Западно-Сибирской стратиграфией // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 1–2. – С. 48–63.
13. Агаджанян А.К., Боярская Т.Д., Глушанкова Н.И. Разрез новейших отложений Мамонтова Гора / Под ред. К.К. Маркова. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 197 с.
14. Гравис Г.Ф. Роль флювиальных процессов в развитии пород ледового комплекса // Криосфера Земли. – 1997. – Т.1, № 2. – С. 56–59.
15. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология. – 2008. – №1. – С.87–94.

Поступила в редакцию 24.10.2014

Тритий в снежном покрове бассейна р. Вилюй

В.Н. Макаров, Н.В. Торговкин

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

Исследовано распределение радиоактивного изотопа водорода – трития в снежном покрове бассейна р. Вилюй. В конце XX века поступление трития в окружающую среду региона и накопление изотопа в снежном покрове происходило в результате регионального атмосферного переноса и соответствовало концентрации изотопа в снежном покрове Южного полюса. К 2013 г. содержание трития в снежном покрове возросло почти в три раза. Наблюдается зависимость между концентрацией трития в снежном покрове и численностью населения селитебных зон. В настоящее время на территории региона существует долгоживущее техногенное радиоактивное загрязнение, обусловленное, главным образом, выпадением из атмосферы радиоактивных продуктов аварии на АЭС «Фукусима» в 2011 г.

Ключевые слова: снег, тритий, химический состав, ландшафты, Якутия.

This study examines the distribution of tritium, a radioactive isotope of hydrogen, in a snow cover in the Viluy River basin. In the late 20th century, tritium in the regional environment and its accumulation in snow originated from regional atmospheric transfer and had concentrations similar to those at the South Pole. By 2013, tritium concentrations in the snowcover increased nearly three times. The tritium concentrations in the snow cover correlate with population density. At present, long-living diffusive radioactive contamination is observed in the region caused mainly by radioactive fallout from the «Fukushima» disaster in 2011.

Key words: snow, tritium, chemical composition, landscapes, Yakutia.

Введение

Тритий (^3H) – радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада ^3H – 12,3 года входит в состав молекул воды и присутствует во всех природных средах: атмосферном воздухе, водах, почве, растительности, снежном покрове. В настоящее время его концентрации в окружающей среде обусловлены глобальными источниками: тритием естественного и искусственного происхождения.

Основная масса природного трития образуется в верхних слоях атмосферы на высотах 10–20 км при ядерных реакциях, вызванных космическими лучами солнечного и галактического происхождения, и сохраняется в стратосфере долгое время. Естественная миграция трития в окружающей среде происходит в основном в результате регионального атмосферного переноса и частично за счет поступления из природных геологических объектов – месторождений углеводородов.

Техногенный тритий появился в окружающей среде в результате испытаний ядерного оружия и использования атомной энергии в мирных це-

лях. Концентрацию трития обычно выражают в тритиевых единицах – TU, которые определяются как 1 атом трития на 10^{18} водородных атомов ($^3\text{H}/\text{H} = 10^{-18}$) и составляют около 7,2 расп./мин на 1 л воды.

Глобальная распространенность трития, относительно большой период полураспада и более высокая биологическая активность, чем у большинства других гамма-бет излучающих изотопов, делают тритий генетически значимым изотопом. Тритий присутствует во всех природных средах: в атмосферном воздухе, водах, почве, растительности, снежном покрове. Тритий легко и достаточно быстро окисляется в воде и наиболее распространенным методом оценки его содержания в окружающей среде является его содержание в атмосферных осадках. Снег, сохраняющий радионуклид в течение всего зимнего периода, служит наиболее надежным индикатором контроля радиоактивного загрязнения воздушной среды. Обладая высокой сорбционной способностью, снежинки поглощают из атмосферы значительную часть продуктов техногенеза и сохраняют накопленную информацию длительное время – в течение всего зимнего периода до снеготаяния. Поэтому анализ снежного покрова является одним из компонентов определения содержания трития

МАКАРОВ Владимир Николаевич – д.г.-м.н., проф., в.н.с., makarov@mpi.ysn.ru; ТОРГОВКИН Николай Владимирович – аспирант, nick1805torg@gmail.com.

в атмосфере. Одна проба, отобранная по всей высоте снежного покрова, дает представление о загрязнении за весь период – 6 месяцев, от установления снежного покрова до момента отбора пробы (конец марта).

Население городов и поселков виллюйских районов Якутии, прилежащих к районам подземных взрывов ядерных устройств и падения отделяемых частей ракетносителей, несмотря на информацию об отсутствии радиоактивного загрязнения, по-прежнему опасается такого загрязнения. С учетом этого и была проведена специальная работа по оценке содержания трития в снежном покрове.

Методика исследований

Маршрут, протяженностью 1200 км, располагался к западу от г. Якутска, вдоль федеральной автодороги «Виллюй», пересекал среднетаёжные мерзлотные ландшафты и достигал г. Мирный, центра алмазодобывающей промышленности РФ. В административном отношении в пределах маршрута находятся территории Мирнинского, Сунтарского, Нюрбинского, Верхневиллюйского, Виллюйского и Горного районов РС(Я), по большей мере не затронутые прямым антропогенным воздействием (рис. 1).

Расстояние между пунктами наблюдений по маршруту составляло 50 км. Участок наблюдений располагался в типичном ландшафте на расстоянии 150–200 м от автодороги. В каждом пункте проводилось 5–6 измерений высоты снежного покрова и определений его плотности, измерялась температура воздуха и снега на поверхности и почве.

Пробы снега на химический анализ отбира-

лись на всю глубину снежного покрова перед началом периода снеготаяния (13–16 марта). Снеговую воду очищали от механических загрязнений путем фильтрования и хранили в закрытых стеклянных емкостях. Для количественного определения трития в пробах воды проводили предварительное обогащение методом одноступенчатого электролиза. Метод основан на значительной разнице в скорости выделения легкого (протия) и тяжелых (дейтерия и трития) изотопов водорода при разрядке ионов на катоде в ходе электролитического разложения воды. Выделяющийся при этом молекулярный водород обогащается протием, а электролит – соответственно тритием и дейтерием. Количественное определение трития в 2013 г. осуществляли в Институте мерзлотоведения СО РАН на ультранизкофономом жидкостном сцинтилляционном спектрометрическом радиометре (QUANTULUS 1220 Perkin Elmer, Inc., США) с альфа- и бета-разделением, с пассивной и активной защитой (Регистрационный номер в Госреестре средств и измерений 19178), а его концентрацию вычисляли относительным методом путем сравнения пробы со стандартным раствором. Ошибка бета-счета на счетной установке не превышает 5%, чувствительность метода составляет 0,7 Бк/л, аналитики М.П. Бурнашева и М.И. Парфенов.

Пробы 1998 г. анализировались на тритий в Национальном институте изучения окружающей среды (Япония).

Химический анализ снеговой воды выполнен в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU 0001.518584), аналитики Л.Ю. Бойцова, Р.М. Петухова и О.В. Шепелева.

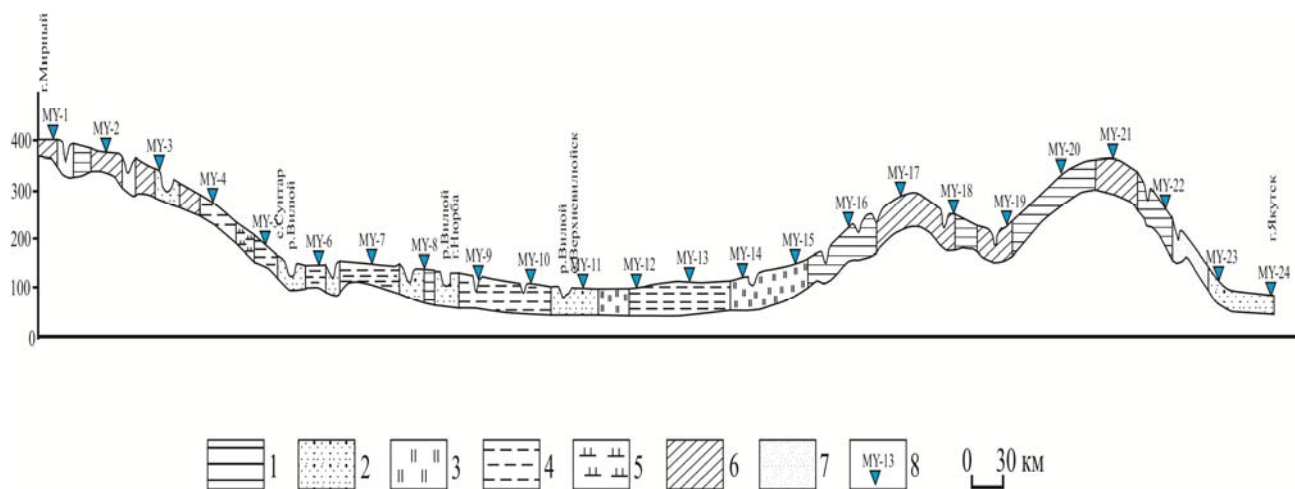


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения.

Типы ландшафтов (местности): 1 – плакорный; 2 – низкотеррасовый; 3 – межгрядово-низинный; 4 – межаласный; 5 – древнетеррасный; 6 – склоновый; 7 – мелкодолинный (аллювиальный); 8 – пункты отбора проб

Результаты и обсуждение

Маршрутно-геохимические исследования проводились в 1998 и 2013 гг., во второй половине марта. Район исследований – Центрально-якутская низменность зимой находится под сильным воздействием Сибирского антициклона. Метеорологические показатели холодных сезонов 1998 и 2013 гг. соответствуют норме в многолетнем ряду, но количество осадков было выше зимой 1998 г. Преобладает безветренная штилевая погода, при которой происходит сильное выхолаживание земной поверхности. Средняя температура воздуха по маршрутам колебалась в пределах $-11,9...-22,5^{\circ}\text{C}$. Диапазон изменения температуры воздуха в пунктах наблюдения колебался от $-5,0$ (1998 г.) до $-42,2^{\circ}\text{C}$ (2013 г.). Температура снега на поверхности почвы была постоянно отрицательной: от $-1,0$ до $-20,3^{\circ}\text{C}$ и составляла в среднем $-13,3^{\circ}\text{C}$.

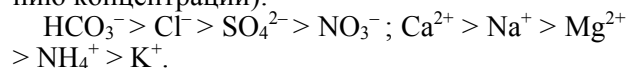
На большей части региона снежный покров залегает в течение 220–250 дней в году. Высота снежного покрова вследствие антициклонального режима погоды сравнительно невелика. Характерной особенностью снежного покрова региона является небольшая плотность. Снег выпадает очень сухой и мало уплотняется в течение зимы. В марте 2013 г. его плотность перед началом снеготаяния составила в среднем $0,150\text{ г/см}^3$.

Концентрация пылевых частиц в снежном покрове незначительна, в среднем $0,007\text{ г/л}$. В табл. 1 приведены полученные нами данные о параметрах снега, температуре воздуха и снега на поверхности почвы в этот период.

Снеговая вода за пределами селитебных зон ультрапресная, с диапазоном колебания величины минерализации в пределах одного порядка $6,69 - 9,24\text{ мг/л}$.

Для снежного покрова характерно следующее соотношение макрокомпонентов (по уменьше-

нию концентрации):



Распределение макрокомпонентов химического состава снежного покрова типично для континентальных районов и подчиняется общей гидрохимической закономерности, в соответствии с которой первым анионом пресных и ультрапресных вод является HCO_3^- . По химическому составу снеговые воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые.

Преобладающее влияние на процессы формирования химического состава снежного покрова в среднетаёжных мерзлотных ландшафтах оказывают соли континентального происхождения. Об этом свидетельствует высокое содержание гидрокарбонатов кальция ($46-70\%$ -экв.). Соли морского происхождения составляют всего около 18% от общего количества солей.

Относительное содержание сульфат-иона в снежном покрове не превышает 10% -экв. ($0,29-0,82\text{ мг/л}$), что отражает низкий уровень техногенного давления в регионе.

Величина pH в снежном покрове присуща для фоновых атмосферных осадков и колеблется в пределах $5,14-6,29$. В загрязнённых техногенных районах Якутии для снега характерны щелочные значения pH [1].

В 1998 г. диапазон концентрации трития в снежном покрове составил 3–18 ТЕ при среднем значении 11 ТЕ, что соответствует планетарному глобальному фону. Так, концентрация трития в снежном покрове Земли Адели (Антарктида) составляла в среднем 11,3 ТЕ [2]. Очевидно, что в снежном покрове вилуйских районов Якутии в конце XX века техногенные источники изотопа полностью отсутствовали и поступление трития в окружающую среду происходило путем его естественной миграции в результате регионального атмосферного переноса и частично за счет поступления из природных геологических объектов – месторождений углеводородов. Техногенные источники изотопа – селитебные и промышленные зоны – расположены на значительных расстояниях друг от друга, небольшие по размерам и не влияют на региональные значения ^3H . На рис. 2 показано изменение концентрации трития в снежном покрове по маршруту исследований.

Почти во всех пробах снеговой воды в 2013 г. содержание трития превышало уровень планетарного глобального фона. На территории исследований в последние пятнадцать лет (с 1998 г.) не появилось существенных источников радиоактивного загрязнения окружающей среды и резкое возрастание концентрации трития в снежном покрове нельзя

Т а б л и ц а 1

Параметры снежного покрова среднетаёжных криогенных ландшафтов (абс. отг. 97–363 м)

Параметры	t, °C		Высота снега, см	Плотность снега, г/см³	T, TE
	воздух	снег на почве			
1998 г. (март 19–22), n=45					
Минимум	–5,0	–1,0	36,0	0,157	2,0±0,1
Максимум	–16,0	–15,0	63,0	0,266	17,4±2,5
Среднее	–11,2	–5,5	47,0	0,204	11,2±2,1
2013 г. (март 13–16), n=24					
Минимум	–11,6	–4,7	22,0	0,112	8,0±1,5
Максимум	–42,2	–20,3	44,0	0,175	70,0± 5,8
Среднее	–22,5	–13,3	32,0	0,150	32,0± 4,0

ТРИТИЙ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ БАСЕЙНА р. ВИЛЮЙ

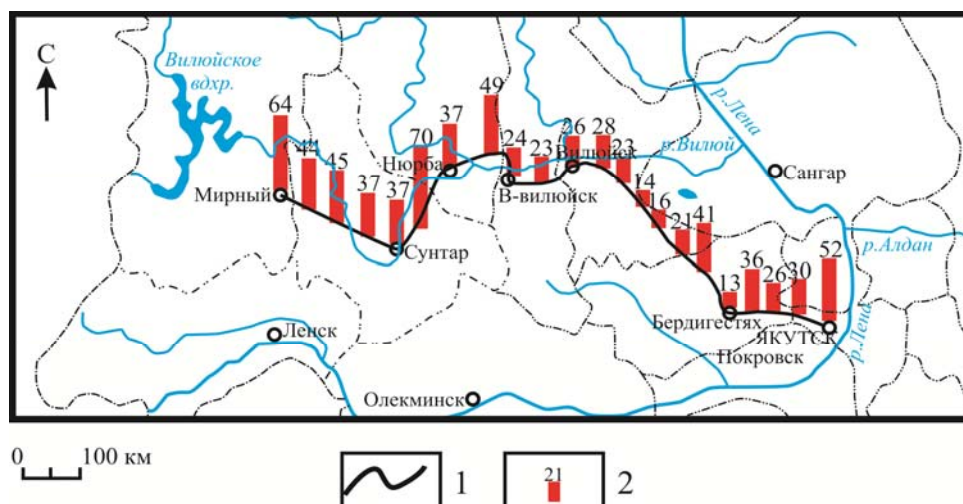


Рис. 2. Содержание трития в снежном покрове (2013 г.): 1 – маршрут; 2 – содержание ^3H , ТЕ

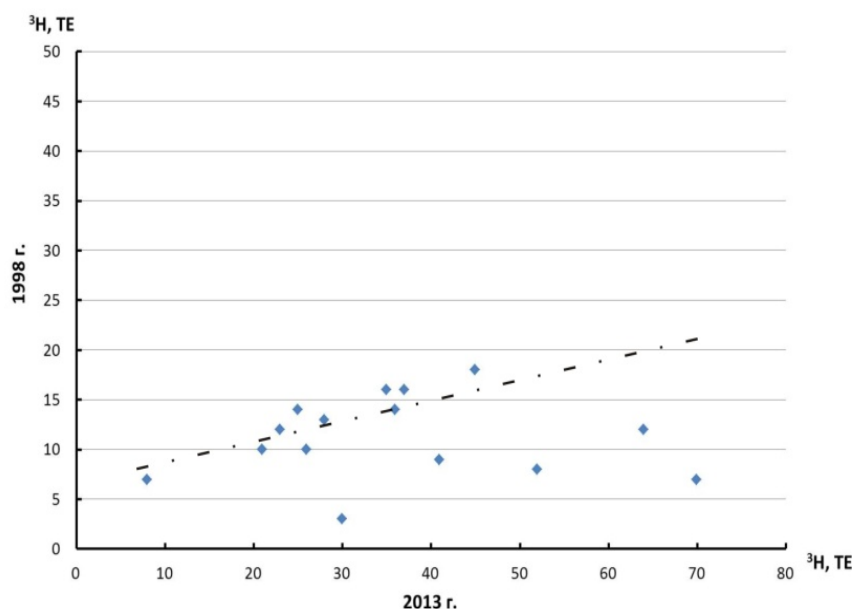


Рис. 3. Соотношение концентрации трития в снежном покрове в 1998 и 2013 гг.

объяснить локальным техногенным воздействием. При отсутствии локального загрязнения это свидетельствует о появившемся внешнем источнике загрязнения радионуклидом атмосферы. В 2013 г. содержание трития в снежном покрове среднетаёжных ландшафтов в вилуйских районах Якутии возросло почти в три раза по сравнению с 1998 г. и составило в среднем 32 ТЕ при вариации в пределах 8–70 ТЕ (рис. 3).

Содержание трития в снежном покрове региона, по-видимому, обусловлено региональным атмосферным переносом и уровень средней концентрации ^3H в среднетаёжных ландшафтах (32 ТЕ, 2013 г.) аналогичен концентрации трития (27–34 ТЕ) в снежном покрове ландшафтов

горных пустынь хребта Сунтар-Хаята на высотах 2,5–2,7 км.

Анализ содержания трития в толще снега показал, что он в основном накапливается в среднем и нижнем горизонтах снежного покрова. Вероятно, при этом большую роль играют процессы изотопного фракционирования, происходящие на границе твердой и газообразной фаз. В то же время преимущественное присутствие трития в тех или иных горизонтах снежного покрова находится в зависимости от подстилающего субстрата. На почвенной поверхности более легкие изотопы водорода обогащают верхние слои снега, в которые поступают и загрязнители (SO_4^{2-}), а более тяжелый изотоп – тритий, накапливается в нижних горизонтах снежного покрова. На водоёмах, где снег лежит на поверхности льда, т. е. на относительно более теплом, чем почвы, субстрате, более интенсивный, чем на почвах, массоперенос привносит в нижние горизонты снежного покрова из минерализованного льда сульфат-ион и легкие изотопы водорода, оттесняя тритий в вышележащие слои снега (табл. 2).

Распределение трития и сульфат-иона в снежном покрове существенно различается. Основным источником сульфатов в атмосфере региона являются техногенные выбросы [1], в то время как для трития преобладает региональный атмосферный перенос.

Распределение трития и сульфат-иона в снежном покрове существенно различается.

Основным источником сульфатов в атмосфере региона являются техногенные выбросы [1], в то время как для трития преобладает региональный атмосферный перенос.

Таблица 2

Распределение трития и сульфат-иона в снежном покрове на различном субстрате

Слой снега	Высота, см	Почвы (склоновый тип местности)		Лед (р.Вилуй)	
		^3H , ТЕ	SO_4^{2-} , мг/л	^3H , ТЕ	SO_4^{2-} , мг/л
Верхний	20–30	17	1,118	14	0,884
Средний	10–20	10	0,681	17	0,892
Нижний	0–10	36	0,576	12	0,969

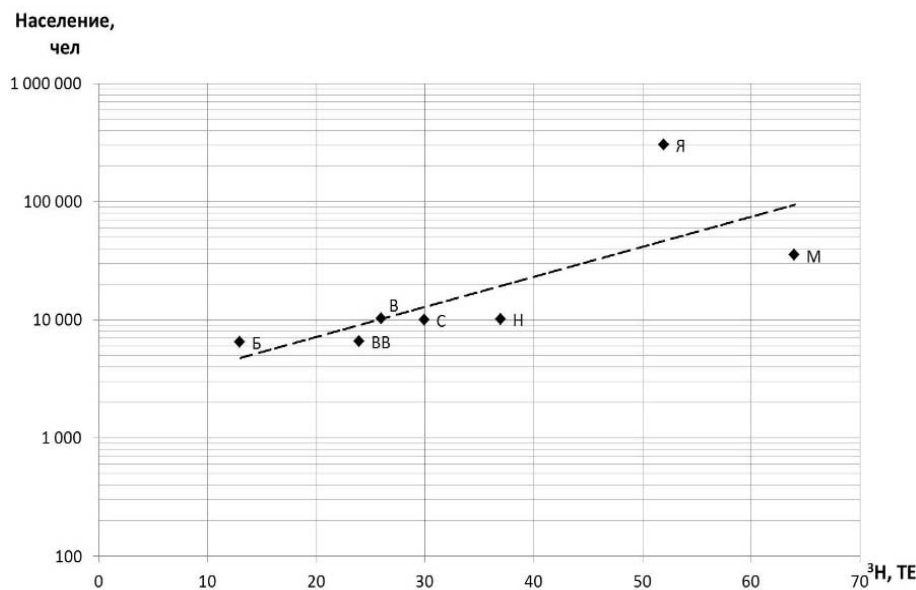
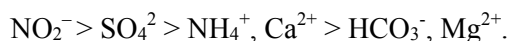


Рис. 4. Зависимость между численностью жителей селитебных зон Якутии и концентрацией ^3H в снежном покрове.
Города и села: Б – Бердигестях, В – Вилуйск, ВВ – Верхневилуйск, М – Мирный, Н – Нюрба, С – Сунтар, Я – Якутск

Корреляционный анализ показал существование значимых корреляционных связей в снежном покрове между величиной минерализации, рН, большинством макрокомпонентов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) и соединениями азота (NO_3^- , NO_2^- и NH_4^+), т.е. с компонентами, определяющими химический состав снега. Значимые корреляционные связи трития с макрокомпонентами химического состава снега отсутствуют. Очевидно, структура поступления изотопа из атмосферы в снежный покров региона иная, чем у главных ионов, и мало зависит от локальных источников.

В техногенных (селитебных) ландшафтах региона химический состав снежного покрова заметно отличается от природных значений. Концентрации нитритов, аммония, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и магния возрастают в 2–6 раз. Степень техногенного накопления макрокомпонентов в снежном покрове максимальна для нитритов и уменьшается в ряду:



Концентрация трития в снежном покрове селитебных зон изменяется в пределах 13–64 ТЕ. Среднее содержание трития равно 35 ТЕ, примерно на 10% выше, чем в природных ландшафтах Якутии. Редкие селитебные зоны в регионе исследований представлены двумя крупными для Якутии городами (Якутск и Мирный) и небольшими городами и селами с численностью жителей от 6 до 10 тыс. человек. Наблюда-

ется определенная зависимость между численностью населения (увеличением количества источников изотопа) и концентрацией трития в снежном покрове селитебных зон (рис. 4).

В селитебных зонах Центральной Якутии некоторое количество трития поступает в окружающую среду из научно-исследовательских центров (Якутск, Мирный), медицинских учреждений и промышленных предприятий, производящих различного рода исследования и работы с применением искусственного трития, из свалок хозяйственных отходов. Этот изотоп используется для производства жидкокристаллических электронных табло, при изготовлении некоторых люминофоров, которые применяются в люминесцентных лампах, электронно-лучевых трубках, для изготовления рентгеновских экранов и др., поступающих затем в отходы. Так объем люминесцентных ламп в отходах производства предприятия «Мирнинский ГОК АЛРОСА» только за один год составляет 2,027 т (2001 г.). В г. Якутске ежегодно предприятиями сдается на утилизацию 50–60 тыс. люминесцентных ламп.

Источники трития, существующие в селитебных зонах Якутии, влияют на небольшую территорию, но иногда могут давать повышенные удельные активности, т.к. тритий сразу же включается в атмосферную воду и все, что было в выбросе, выпадет тут же на месте, на небольшом пространстве.

За последние 15 лет, с конца XX века, средняя концентрация трития в снежном покрове региона увеличилась почти в три раза, с 11 ТЕ (1998 г.) до 32 ТЕ (2013 г.). После аварии на японской АЭС «Фукусима-1» наблюдалось повышение объемной активности техногенных радионуклидов в марте и апреле 2011 г. в приземной атмосфере и на территории России [3]. По данным [4], объемная активность трития в атмосферных осадках на территории Якутии в 2011 г. составляла 26 ТЕ, примерно на $\frac{1}{4}$ выше уровня 2010 г. (21 ТЕ). Считается, что искусственные радиоактивные вещества, попавшие в биосферу Якутии в результате трансграничного переноса продуктов аварии на японской АЭС «Фукусима-1», оказали кратковременное неблагоприятное влияние на окружающую среду.

За последние 15 лет, с конца XX века, средняя концентрация трития в снежном покрове региона увеличилась почти в три раза, с 11 ТЕ (1998 г.) до 32 ТЕ (2013 г.). После аварии на японской АЭС «Фукусима-1» наблюдалось повышение объемной активности техногенных радионуклидов в марте и апреле 2011 г. в приземной атмосфере и на территории России [3]. По данным [4], объемная активность трития в атмосферных осадках на территории Якутии в 2011 г. составляла 26 ТЕ, примерно на $\frac{1}{4}$ выше уровня 2010 г. (21 ТЕ). Считается, что искусственные радиоактивные вещества, попавшие в биосферу Якутии в результате трансграничного переноса продуктов аварии на японской АЭС «Фукусима-1», оказали кратковременное неблагоприятное влияние на окружающую среду.

гоприятное воздействие на окружающую среду [3].

Увеличение концентрации трития в снежном покрове вилуйских районов Якутии в 2013 г. по сравнению с данными конца XX века можно объяснить воздействием выбросов в атмосферу радионуклидов, в том числе и трития, при катастрофе на АЭС «Фукусима-1» (11.03.2011г.), влияние которого может ощущаться до начала двадцатых годов XXI века.

Литература

1. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии.

– Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. – 152 с.

2. Ravoire J., Lorius C. et al. Tritium content in a firn core from Antarctica. – J. Geophys. Res. – 1970. – V. 75, № 5722. – P. 479–480.

3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году». – М.: МПР России, 2012. – 351 с.

4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей природной среды Республики Саха (Якутия) в 2011 году / Правительство Республики Саха (Якутия); М-во охраны природы Республики Саха (Якутия). – Якутск: Дани-Алмас, 2012. – 216 с.

Поступила в редакцию 07.10.2014

УДК 569.614

Шерстистый мамонт (*Mammuthus primigenius*) из местонахождения «Селлях»

В.В. Плотников, Е.Н. Мащенко*, Г.Г. Боескоров**, А.В. Протопопов, А.И. Климовский,
С.Д. Колесов, И.И. Колодезников, ван дер Плихт Й.***

Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

* Палеонтологический институт РАН, г. Москва

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

*** Факультет математики и естественных наук Университета Гронинген, г. Гронинген

Представлены данные о мамонтовой фауне местонахождения «Селлях» Усть-Янского района Республики Саха (Якутия). Место находки было обнаружено в 2012 г. местными недропользователями–сборщиками бивней на правом берегу р. Селлях, впадающей в Селляхскую губу. Местонахождение характеризуется, в основном, скоплением костных остатков *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799). Остатки других крупных млекопитающих мамонтовой фауны представлены единичными находками трех видов – *Equus lenensis* (Russanov, 1968), *Bison* sp., *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799). На местонахождении собрано 62 экземпляра костей от разных частей скелетов двадцати разновозрастных особей. Собранный на Селляхе палеонтологический материал обрабатывался по стандартной методике, используемой для морфометрических исследований крупных млекопитающих. Измерения проводились рулеткой и электронным штангенциркулем. Для определения размерно-возрастных групп был использован материал Е.Н. Мащенко (1992). Предварительные данные о возрастном и половом составе особей, погибших в Селляхе, сходны с возрастным и половым составом семейной группы современных африканских слонов *Loxodonta africana* (Blumenbach, 1797). Результаты радиоуглеродных датировок, проведенных в г. Гронинген (Нидерланды), коррелируются со временем конца позднего плейстоцена.

Ключевые слова: шерстистый мамонт *Mammuthus primigenius*, поздний плейстоцен, р. Селлях, структура группы.

ПЛОТНИКОВ Валерий Валерьевич – к.б.н., с.н.с., mammuthus@mail.ru; *МАЩЕНКО Евгений Николаевич – к.б.н., с.н.с., evmasch@mail.ru; **БОЕСКОРОВ Геннадий Гаврилович – д.б.н., в.н.с., gboeskorov@mail.ru; ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич – к.б.н., в.н.с., a.protopopov@mail.ru; КЛИМОВСКИЙ Айсен Иванович – м.н.с., cool.propagandist@yandex.ru; КОЛЕСОВ Станислав Дмитриевич – м.н.с., kolesov.stanislav@mail.ru; КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., президент АН РС (Я), anrsya@mail.ru; ***Йоханес ван дер Плихт – проф. фак-та математики и естественных наук Университета Гронинген, j.van.der.plicht@rug.nl.

гоприятное воздействие на окружающую среду [3].

Увеличение концентрации трития в снежном покрове вилуйских районов Якутии в 2013 г. по сравнению с данными конца XX века можно объяснить воздействием выбросов в атмосферу радионуклидов, в том числе и трития, при катастрофе на АЭС «Фукусима-1» (11.03.2011г.), влияние которого может ощущаться до начала двадцатых годов XXI века.

Литература

1. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии.

– Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. – 152 с.

2. Ravoire J., Lorius C. et al. Tritium content in a firn core from Antarctica. – J. Geophys. Res. – 1970. – V. 75, № 5722. – P. 479–480.

3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году». – М.: МПР России, 2012. – 351 с.

4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей природной среды Республики Саха (Якутия) в 2011 году / Правительство Республики Саха (Якутия); М-во охраны природы Республики Саха (Якутия). – Якутск: Дани-Алмас, 2012. – 216 с.

Поступила в редакцию 07.10.2014

УДК 569.614

Шерстистый мамонт (*Mammuthus primigenius*) из местонахождения «Селлях»

В.В. Плотников, Е.Н. Мащенко*, Г.Г. Боескоров**, А.В. Протопопов, А.И. Климовский, С.Д. Колесов, И.И. Колодезников, ван дер Плихт Й.***

Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

* Палеонтологический институт РАН, г. Москва

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

*** Факультет математики и естественных наук Университета Гронинген, г. Гронинген

Представлены данные о мамонтовой фауне местонахождения «Селлях» Усть-Янского района Республики Саха (Якутия). Место находки было обнаружено в 2012 г. местными недропользователями–сборщиками бивней на правом берегу р. Селлях, впадающей в Селляхскую губу. Местонахождение характеризуется, в основном, скоплением костных остатков *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799). Остатки других крупных млекопитающих мамонтовой фауны представлены единичными находками трех видов – *Equus lenensis* (Russanov, 1968), *Bison* sp., *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799). На местонахождении собрано 62 экземпляра костей от разных частей скелетов двадцати разновозрастных особей. Собранный на Селляхе палеонтологический материал обрабатывался по стандартной методике, используемой для морфометрических исследований крупных млекопитающих. Измерения проводились рулеткой и электронным штангенциркулем. Для определения размерно-возрастных групп был использован материал Е.Н. Мащенко (1992). Предварительные данные о возрастном и половом составе особей, погибших в Селляхе, сходны с возрастным и половым составом семейной группы современных африканских слонов *Loxodonta africana* (Blumenbach, 1797). Результаты радиоуглеродных датировок, проведенных в г. Гронинген (Нидерланды), коррелируются со временем конца позднего плейстоцена.

Ключевые слова: шерстистый мамонт *Mammuthus primigenius*, поздний плейстоцен, р. Селлях, структура группы.

ПЛОТНИКОВ Валерий Валерьевич – к.б.н., с.н.с., mammuthus@mail.ru; *МАЩЕНКО Евгений Николаевич – к.б.н., с.н.с., evmasch@mail.ru; **БОЕСКОРОВ Геннадий Гаврилович – д.б.н., в.н.с., gboeskorov@mail.ru; ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич – к.б.н., в.н.с., a.protopopov@mail.ru; КЛИМОВСКИЙ Айсен Иванович – м.н.с., cool.propagandist@yandex.ru; КОЛЕСОВ Станислав Дмитриевич – м.н.с., kolesov.stanislav@mail.ru; КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., президент АН РС (Я), anrsya@mail.ru; ***Йоханес ван дер Плихт – проф. фак-та математики и естественных наук Университета Гронинген, j.van.der.plicht@rug.nl.

Data on a mammoth's fauna of 'Sellyakh' site, located in Ust-Yansky Ulus, the Republic of Sakha (Yakutia) are presented in the article. The site has been discovered in 2012 by local people with the right to collect mammoth tusks on the right bank of the river Sellyakh, which flow into the Sellyakh Bay. The site is characterized mainly by accumulation of fossil remains of the *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799). Remains of other large mammals of the mammoth fauna are presented by singular finds of three species – *Equus lenensis* (Russanov, 1968), *Bison* sp., *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799). Sixty two bones belonging to different parts of skeletons of twenty mammals of different age have been collected at the site. Paleontological material collected on the Sellyakh site has been examined according to standard procedures used for morphometric studies of large mammals. Measurements have been carried out with a tape measure and an electronic caliper. Size and age groups of the mammals have been identified with the help of materials from the work of E.N. Mashchenko, 1992. Preliminary data on the age and sex of the mammoths died in Sellyakh are similar to the age and sex of a family group of modern African elephants *Loxodonta africana* (Blumenbach, 1797). The results of radiocarbon dating conducted in Groningen (the Netherlands) correlate with the end of the Late Pleistocene.

Key words: woolly mammoth *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799), Late Pleistocene, Sellyakh River, group composition.

Междуречье Яны и Индигирки севернее 71° с.ш. является уникальным районом находок остатков крупных млекопитающих позднего плейстоцена. За последние десятилетия на территории Усть-Янского района Республики Саха (Якутия) был обнаружен ряд уникальных палеонтологических находок [1]. Одна из причин возросшего числа открытий – активность местного населения в сфере традиционных промыслов – сборе бивня мамонта. Летом 2011 г. местные недропользователи-сборщики мамонтового бивня обнаружили на небольшом участке берега р. Селлях несколько не крупных по размерам костей и фрагментов черепов мамонтов. Кроме того, все найденные ими бивни также были небольшого размера. После сообщения недрополь-

зователей в августе 2012 г. на р. Селлях была организована экспедиция АН РС(Я).

Местонахождение «Селлях» расположено на правом берегу р. Селлях (верхнее течение) в 57 км к востоку от п. Тумат Усть-Янского района 70°46'05" с.ш. и 140°46'19" в.д. (рис.1.1). «Селлях» (як. назв. «Илин Сылах») является местонахождением, характерным именно для северо-восточных районов Якутии. Во время осмотра местонахождения и проведения раскопок участниками экспедиции было установлено, что кости залегают в одном горизонте. Концентрация костей по горизонтали невелика, примерно 10–12 м. Глубина залегания 5–6 м. Около 99% всех обнаруженных в Селляхе костей принадлежат виду *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799) (62 экз.). Остатки других крупных млекопитающих мамонтовой фауны представлены единичными находками трех видов – *Equus lenensis* (Russanov, 1968), *Bison* sp., *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799). Полученная в Университете Гронингена (Groningen University, Нидерланды) радиоуглеродная датировка одной из костей мамонта с Селляха показала возраст 12470 ± 50 лет (GrA-60423), что соответствует беллинговскому колебанию климата конца позднего плейстоцена.

Высота берегового обрыва на обнажении Селлях около 9–10 м, протяженность 40–50 м (рис. 2.1). Обнажение, видимо, образовалось в 2010–2011(?) гг. и на начальном этапе размыва берега его площадь была меньше (менее 10 м). В последующем, вследствие термоабразионных процессов, местонахождение расширилось (рис. 2.2). Многолетние льды тонким слоем (20–30 см) вертикально пронизывают обнажение в нескольких местах (рис. 2.2.9). Структура отложений указывает на принадлежность к едомной свите, распространенной в данном районе.

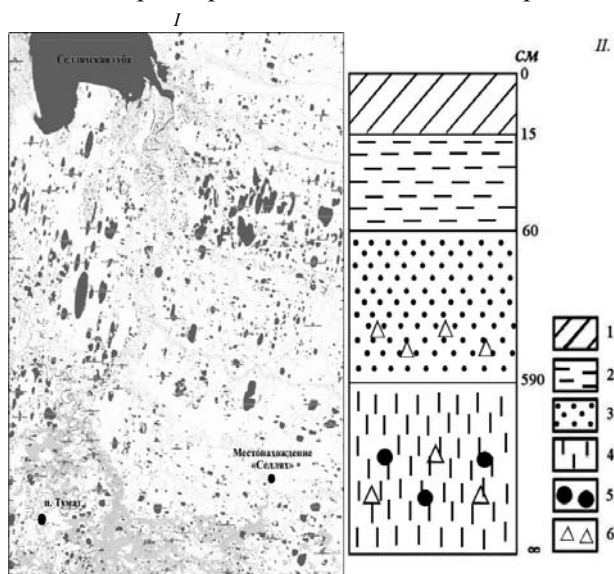


Рис. 1. Местонахождение «Селлях», правый берег р. Селлях верхнее течение, Усть-Янский район РС(Я): I – карта; II – схема геологического разреза (см): 1 – дерн; 2 – суглинок (рыхлый); 3 – супесь; 4 – суглинок (плотный); 5 – остатки ископаемых млекопитающих; 6 – остатки растительности

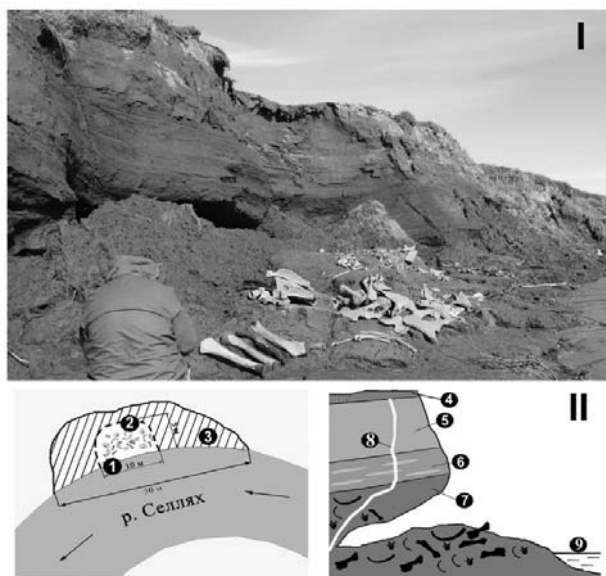


Рис. 2. Общий вид и схематическое расположение остеологического материала: I – обнажение на правом берегу р. Селлях; II – продольный разрез местонахождения и схема расположения костей. 1 – урез речной воды; 2 – предполагаемая граница расположения костных остатков; 3 – расширенный вследствие термоабразии участок местонахождения без костных остатков; 4 – современный слой; 5 – суглинок светло-серого цвета; 6 – супесь изученный с прослойками светлого песка; 7 – суглинок темно-серого цвета, костеносный горизонт; 8 – тонкий лед, пронизывающий вертикально почвенные горизонты; 9 – уровень речной воды

Скопления костей мамонтов в одном месте представляют довольно большую редкость и интерес для палеонтологии и при их изучении необходимо исследовать возрастной состав погибших животных, время и причины образования этого скопления.

Материал и методика

1. Собранный на Селляхе палеонтологический материал выпал из берегового обнажения на берег в результате термоабразии и солифлюкции или был извлечен при раскопках. Измерения проводились рулеткой (точность 1 мм) и электронным штангенциркулем (точность 0,01 мм). Для определения размерно-возрастных групп был использован материал из работы [2].

2. Исследованный из местонахождения «Селлях» материал включал костные остатки *M. primigenius* с полевыми номерами: бивень (Т-1, -2, -3, -4, -5, -6, -7, -8); череп (SL-1, -2, -3); нижняя челюсть (SL-4, -5, -72, -92, -93); лопатка (SL-10, -11, -13, -14, -33, -12, -32, -77); плечевая кость (SL-15, -16, -18, -71, -17, -19); большая берцовая кость (SL-20, -21, -22, -23, -24, -51, -52, -89, -90); бедренная кость (SL-25, -26, -27, -28, -50, -78, -79, -82, -83, -49, -80, -81, -84); первый

шейный позвонок (SL-29, -30, -68, -70); локтевая кость (SL-31, -53, -85, -86, -87, -88).

3. Для сравнения использованы данные по следующим материалам: бивень ПИН, № 4353–687 (инд. возр. 17 лет, самка); бивень ПИН, № 4353–3567 (инд. возр. 60 лет, самка); бивень ПИН, № 4353–3566 (инд. возр. около 50 лет, самец); бивень ПИН, № 4353–3565 (инд. возр. 50 лет, самец); плечевая кость ПИН, № 4353–630; плечевая кость ЗИН, № 31736; плечевая кость ЗИН, № 2710.

4. В работе использованы сокращения: Палеонтологический институт РАН – ПИН; Зоологический институт РАН – ЗИН; Ибресинский этнографический музей – ИЭМ. Обозначения генераций зубов мамонтов: I – бивень постоянной (второй) смены. Значения полевых номеров: Т – п. Тумат; SL – Селлях.

5. Данные о размерной изменчивости костей мамонтов из Селляха будут представлены в следующей публикации.

Результаты и обсуждение

У большинства длинных костей конечностей мамонтов не сохранились эпифизы. Тафономия Селляха указывает на то, что формирование местонахождения происходило за небольшой по сравнению, к примеру, с Берелехским «кладбищем» мамонтов промежуток времени. Накопление костного материала, как и на Берелехском местонахождении, происходило не избирательно и сопровождалось привнесом костей других видов млекопитающих мамонтовой фауны. Например, на Берелехе количество костей других видов млекопитающих составляет около 8% от общего количества костей, собранных на этом местонахождении [2]. Все костные остатки были собраны с ограниченной площади 10 x 5 м и на глубине около 5,9–7 м, чуть выше уровня речной воды, в одном горизонте (рис. 2. II). Следов обработки костей древним человеком нет.

По размерам затылочных мышелков мамонты из Селляха меньше других особей с северо-востока Якутии [1, 3, 4], например, мельче затылочных мышелков Ляховского мамонта (самца) с генерацией зубов М1–М2 и с индивидуальным возрастом около 25–30 лет, соответственно [5]. По этим данным можно предполагать, что черепа особей из Селляха принадлежат либо более молодым, либо более мелким особям (самкам).

Было собрано шесть нижних челюстей мамонтов с разными сменами зубов. Смена dp4–m1 на двух экземплярах (SL-4, -72). По сходной степени стирания зубов можно предположить, что это особи одного возраста. По шкале опре-

Таблица 1

Предполагаемое количество особей
(по левым и правым костям)

Кол-во особей	Сторона	Tibia	Femur	Ulna	Humerus	Scapula	Atlant	Incisive	Mandibula	Cranium	Возможный индивидуальный возраст, лет
1	dex								♦		1–6
	sin	♦				♦					
1	dex										1–6
	sin	♦									
1	dex										1–6
	sin	♦									
1	dex										1–6
	sin	♦									
1	dex										1–6
	sin	♦									
1	dex				♦	♦	♦	♦	♦	♦	20–30
	sin			♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	
1	dex				♦	♦	♦	♦	♦	♦	20–30
	sin			♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	
1	dex				♦	♦	♦		♦		20–30
	sin				♦	♦	♦		♦		
1	dex				♦				♦		20–30
	sin				♦				♦		
1	dex		♦				♦				6–16
	sin		♦	♦			♦				
1	dex		♦								6–16
	sin		♦	♦							
1	dex		♦								6–16
	sin		♦	♦							
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								
1	dex		♦								6–16
	sin		♦								

ШЕРСТИСТЫЙ МАМОНТ (*MAMMUTHUS PRIMIGENIUS*) ИЗ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ «СЕЛЛЯХ»

Таблица 2

Возможный индивидуальный возраст (при прямом сравнении размеров с особями из других популяций)

Экз.№	Название	I. 1–6 лет	II. 6–16 лет	III. 20–30 лет	IV. 30–45 лет
SL-1	Cranium			x	
SL-2	Cranium			x	
SL-3	Cranium				x
SL-4	Mandibula			x	
SL-5	Mandibula	x			
SL-72	Mandibula			x	
SL-92	Mandibula			x	
SL-93	Mandibula			x	
SL-94	Mandibula			x	
SL-29	Anlant			x	
SL-68	Anlant		x		
SL-69	Anlant			x	
SL-70	Anlant			x	
T-1	Tusk			x	
T-5	Tusk			x	
T-6	Tusk			x	
T-7	Tusk			x	
SL-10	Scapula			x	
SL-11	Scapula			x	
SL-12	Scapula			x	
SL-13	Scapula			x	
SL-14	Scapula	x			
SL-32	Scapula			x	
SL-33	Scapula			x	
SL-77	Scapula			x	
SL-15	Humerus			x	
SL-16	Humerus			x	
SL-17	Humerus			x	
SL-18	Humerus			x	
SL-19	Humerus			x	
SL-71	Humerus			x	
SL-31	Ulna			x	
SL-53	Ulna			x	
SL-85	Ulna		x		
SL-86	Ulna		x		
SL-87	Ulna			x	
SL-88	Ulna		x		
SL-25	Femur		x		
SL-26	Femur		x		
SL-27	Femur		x		
SL-50	Femur		x		
SL-78	Femur		x		
SL-79	Femur		x		
SL-82	Femur		x		
SL-83	Femur		x		
SL-49	Femur		x		
SL-80	Femur		x		
SL-81	Femur		x		
SL-94	Femur		x		
SL-20	Tibia				x
SL-21	Tibia	x			
SL-22	Tibia				x
SL-23	Tibia				x
SL-24	Tibia	x			
SL-51	Tibia				x
SL-52	Tibia				x
SL-89	Tibia				
SL-90	Tibia				x

30 лет – 50%, 6–16 лет – 28,3%, 40–45 лет – 11,6% от общего количества животных и 10% детеныши – 1–6 лет. В местонахождениях, ассоциированных с палеолитическими памятниками (Мезенская палеолитическая стоянка, Луговское, Волчья грива, Тегульдэт) [1, 13], половозрелые особи составляют не менее 50% от общего количества особей, так же как и на Селляхе, тогда как в естественных местонахождениях Севск их доля меньше [1, 11]. Следует учитывать, что выборка в Селляхе относительно невелика и данные о составе группы могут быть скорректированы.

Обнаружение остатков мамонтов в одном горизонте на берегу реки и малое количество костного материала по сравнению с Берелехским «кладбищем», говорят, по-видимому, об односезонности гибели. Кроме того, костный материал варьирует по возрастным показателям, т.е. гибель не была выборочной. Возможно, небольшая группа мамонтов погибла в результате какого-то несчастного случая (половодье, увязание в болоте), аналогично Севскому местонахождению.

Современные данные показывают, что структура семейной группы мамонтов схожа с таковой африканских слонов *Loxodonta africana* (Blumenbach, 1797), состоящей из самок с их детенышами [1, 11, 13]. Самцы по достижению половозрелости покидают стадо (изгоняются старшей самкой) и создают группу из таких же молодых самцов. Формирование подобной структуры групп максимально соответствует стратегии выживания у слонов, включая коллективное поведение в заботе о детенышах и защите от хищников.

Воздействие хищников на таких крупных животных, как мамонты, было очень ограничено. Небольшое количество свидетельств указывает на охоту на мамонта человеком позднего палеолита [13]. У шерстистого мамонта защитные формы поведения могли формироваться сходным с современными слонами способом.

Заключение

На территории Якутии подобные захоронения с преобладанием остатков *M. primigenius* встречаются довольно редко. Большая часть этих местонахождений находится на территории Яно-Индибирской низменности: Берелехское «кладбище» мамонтов; Максунуохское местонахождение; Аччыгый Аллаиха. Кроме того, аналогичное захоронение было обнаружено на территории Амгинского района (Центральная Якутия), в среднем течении р. Амга, на берегу старичного озера Тонус кыса, хотя по количеству особей оно значительно уступает последним.

Млекопитающие мамонтовой фауны в позднем плейстоцене Яно-Индигирской низменности обитали в условиях открытых и полукрытых ландшафтов (арктическая степь, заросли кустарников). В течение этого периода происходило несколько кардинальных изменений ландшафтно-климатических условий. Во время потеплений (например, беллингское колебание) на Яно-Индигирской низменности создавались губительные условия для наиболее крупных представителей мамонтовой фауны в силу специфики рельефа (преобладание низменных местобитаний) и наличия бассейнов крупных рек (Омолуй, Яна, Индигирка), по-видимому, разливы рек в половодья могли губить целые стада мамонтов.

Материал подготовлен при поддержке гранта РФФИ 12-04-98510-р_восток_a.

Литература

1. Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Mashchenko E.N. et al. Preliminary analyses of the frozen mummies of mammoth (*Mammuthus primigenius*), bison (*Bison priscus*) and horse (*Equus* sp.) from the Yana-Indigirka Lowland, Yakutia, Russia // Integrative Zoology. – 2014. – 9. – P. 471–480.
2. Maschenko E.N. Individual development, biology and evolution of the woolly mammoth *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799) // Cranium. – 2002. – V. 19, №1. – 120 p.
3. Аверьянов А.О. Мамонт Кутоманова // Тр. ЗИН РАН. – 1994. – Т. 256. – С. 111 – 134.
4. Roth V.L., Shoshani J. Dental identification and age determination in *Elephas maximus* // J. Zool. Lond. – 1988. – 214. – P. 567–588.
5. Тихонов А.Н. Мамонт, *Mammuthus primigenius* (Elephantidae, Proboscidea) с острова Большой Ляховский, Восточная Сибирь // Четвертичные и современные млекопитающие Евразии: тр. ЗИН РАН. – 1996. – Т. 270. – С. 167–190.
6. Портенко Л.А., Тихомиров В.А., Попов А.И. Первые результаты раскопок таймырского мамонта и изучение условий его залегания (Работа Таймырской комплексной экспедиции АН СССР, 1949) // Зоологический журнал. – 1951. – Т. XXX, вып. I. – С. 14–15.
7. Верецагин Н.К., Тихонов А.Н. Исследования бивней мамонтов // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. – 1986. – Т. 149. – С.3–14.
8. Kuzmina I.E., Tsyganova S.A. *Mammuthus primigenius* Blum. On Ural. In: 2nd International mammoth conference. Abstracts. – Rotterdam Netherlands: Naturmuseum, 1999. – P. 32.
9. Кузьмина И.Е. Сравнительная морфологическая характеристика мамонтов Русской равнины, Урала и Якутии в позднем плейстоцене // Плейстоценовые и голоценовые фауны Урала: сб. научных трудов. – Челябинск: Рифей, 2000. – С. 3–16.
10. Mashchenko E.N., Gablina S., Tesakov A.S., Simakova A.N. The Sevska woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) site in Russia: Taphonomic, biological and behavioral interpretations // Quaternary International. – 2006. – V. 142/143. – P. 147–165.
11. Мащенко Е.Н., Шубина Ю.В., Телегина С.Н. Луговское. Пейзаж на фоне ледников. – Ханты-Мансийск: Государственный музей природы и человека. – Екатеринбург: Баско, 2006. – 82 с.
12. Дуброво И.А. Морфология скелета Юрибейского мамонта // Юрибейский мамонт. – М., 1982. – С. 53–99.
13. Nikolskiy P., Pitulko V. Convincing evidence of mammoth hunting in the Siberian Arctic between 29,000 and 27,000 14C years BP (new data from Yana Palaeolithic site) // Vith Intern Conference on Mammoths and their relatives. Abstract book. Thessaloniki, 2014. – P.140.

Поступила в редакцию 25.11.2014

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.396.96:624.863:+625.76 (571.56)

Результаты экспериментальных георадиолокационных обследований ледовых переправ и автомобильных дорог Якутии

Л.Л. Федорова, А.В. Омеляненко*, М.П. Федоров, Д.В. Саввин

Институт горного дела Севера СО РАН, г. Якутск

**Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск*

С целью совершенствования методов диагностики автодорог криолитозоны проведены экспериментальные исследования возможностей применения георадиолокации для обследования строения и состояния грунтов дорожной одежды и ледовых переправ. Исследования проведены на примере ледовой переправы «Якутск – Нижний Бестях», подстилающих пород автомобильной дороги с асфальтовым покрытием «Нижний Бестях – Майя» и грунтовой дороги «Амга». Данные получены георадаром ОКО-2М с антенным блоком АБ-400 (ООО «Логис»). Представлены практические результаты контактных и дистанционных георадиолокационных измерений толщины речного льда на ледовой переправе и дорожной одежды автомобильных дорог. По результатам измерений построена карта распределения толщины речного льда и оценена грузоподъемность по всей длине ледовой переправы. Изучено строение конструктивных слоев дорожной одежды грунтовой дороги «Амга» и определена мощность отсыпки грунтов. Данные георадиолокации показали, что на участке «Якутск – Нижний Бестях» прослеживается контрастная линза грунтов повышенной влажности протяженностью 180 м. В этом месте ожидаются криогенные процессы и дальнейшая деформация асфальтового покрытия. Показана перспективность метода георадиолокации для определения толщины речного льда в месте ледовых переправ и толщины конструктивных слоев дорожной одежды с выявлением зон повышенной влажности и разуплотнением грунтов автомобильных дорог.

Ключевые слова: георадиолокация, ледовая переправа, автомобильная дорога, разрез, состояние грунтов.

Experimental studies of applicability of GPR for surveying structure and condition of a subgrade road surfaces and ice crossings were conducted for purpose to improve diagnostic methods for cryolithozone roads. The studies were performed on the example of the ice crossing «Yakutsk-Nizhny Bestyakh», the underlying rocks of the asphalted road «Nizhny Bestyakh-Maya» and the earth road «Amga». The data were received by a georadar OKO-2M with the antenna assembly AB-400 (LLC «LogiS»). Practical results of contact and radar measurements of the river ice thickness on the ice crossing and the road surface of the highway are presented. A map of distribution of the river ice thickness was generated based on the measured data and the weight carrying capacity of the ice crossing throughout its length was evaluated. The structure of the constructional layers of subgrade road surface «Amga» was explored and thickness of landfilling was estimated. The 180 meters of a contrast lens of material with high moisture on the section «Yakutsk–Nizhny Bestyakh» is shown based on the GPR data. In this area cryogenic action processes and further damage of the asphalt road

ФЕДОРОВА Лариса Лукинична – к.т.н., доцент, и.о. зав. лаб., lar-fed-90@rambler.ru; *ОМЕЛЯНЕНКО Александр Васильевич – д.т.н., г.н.с., omeravel@yandex.ru; ФЕДОРОВ Максим Петрович – вед. инженер mpfedoroff@gmail.com; САВВИН Денис Валерьевич – к.т.н., м.н.с., savvin.denis@inbox.ru.

covering are expected. The ability of GPR for determining a thickness of river ice in a place of ice crossings and the a thickness of structural layers of a road pavement with identification of areas of high humidity and highways soil decompression is demonstrated.

Key words: GPR, ice crossing, road, geological section, state of soils.

Введение

В условиях Крайнего Севера строительство и эксплуатация инженерных сооружений – экономически затратный процесс. Прежде всего, это связано с чрезвычайно сложными климатическими условиями, наличием сезонно-талых грунтов и распространением многолетнемерзлых грунтов различного физико-механического свойства. Строительство и эксплуатация инженерных сооружений в криолитозоне вносят большие изменения в естественный температурный и водный режим многолетнемерзлых грунтов. Все это сопровождается активизацией опасных природных процессов, образованием таликов, криопэгов, оползней, оказывающих существенное негативное влияние на техническое состояние инженерных сооружений и приводящих нередко к аварийным ситуациям. Влияние этих изменений необходимо учитывать при принятии проектных решений при строительстве, эксплуатации и реконструкции инженерных сооружений. Для планирования объемов вышеперечисленных работ требуется оперативная информация о строении и состоянии подстилающих грунтов.

В настоящее время одним из передовых дистанционных методов неразрушающего контроля признан метод георадиолокации. Благодаря высокой производительности работ и детальности исследований, как в плане, так и в разрезе, а также возможности производства измерений в условиях урбанизированных территорий, метод успешно применяется как в России, так и за рубежом.

Ниже приведены примеры экспериментальных георадиолокационных обследований ледо-



Рис. 1. Автомобильный измерительный комплекс на подвеске автомобиля «Соболь»

вых переправ и автомобильных дорог Якутии. Для увеличения производительности георадиолокационной съемки применена автомобильная лаборатория (рис.1) с автоматической привязкой точек измерений по каналу GPS. Используемая аппаратура при исследованиях – георадар «ОКО-2М» с центральной частотой 400 МГц. Технологическая скорость съемки до 20 км/ч в зависимости от детальности работ. Экспериментально установленный подъем антенн от 30 до 100 см.

Результаты георадиолокационных измерений ледовых переправ р. Лена

В транспортной схеме Республики Саха (Якутия) единственной круглогодичной наземной линией является автомобильная дорога федерального значения М-56 «Лена» от Невера до Якутска. Общая протяженность сети автомобильных дорог на территории Республики Саха (Якутия) составляет свыше 30000 км, из которых более половины представлены сезонными автомобильными дорогами с ледовыми переправами через реки. Толщина речного льда и его структура в течение периода эксплуатации ледовой переправы могут меняться под воздействием погодных, техногенных и других факторов. Возникает необходимость оперативного контроля за состоянием ледовой переправы, при этом основное условие для безопасного передвижения по льду определяется [1]:

- для совершения пешей переправы от 15 см,
- для проезда легковых автомобилей не менее 30 см,
- для проезда грузовых автомобилей в зависимости от массы самого автомобиля от 70 см.

С точки зрения распространения электромагнитной волны – пресный лед высокоскоростная среда с низкими поглощающими свойствами и является благоприятной средой для изучения методом георадиолокации. Диэлектрическая проницаемость пресного льда имеет табличное значение $\epsilon' = 3,2$. Расчетная скорость распространения электромагнитной волны внутри льда 17,3 см/нс. Методика измерений толщины речного льда основана на определении времени задержки между сигналами, отраженными от его верхней и нижней поверхностей. Скорость распространения электромагнитных волн радиолокационного диапазона в пресном льду постоян-

ная величина, поэтому его толщина пропорциональна времени задержки. Измерение ледяного покрова рек может осуществляться непосредственно с автомобиля или с воздушного транспорта.

На рис. 2 представлен результат георадиолокационных исследований с борта вертолета участка р. Лена по трассе, пересекающей ледовую переправу. На профиле эти участки выделяются повышенной толщиной льда более 2 м. По результатам измерений видно, что наиболее оптимально проложена правая дорога (метка 1), т.к. ее полотно симметрично относительно оси мощности сформированного льда. Результаты данных измерений подтверждены замерами мощности льда в лунках.

На рис. 3 приведены результаты непрерывного профилирования ледовой переправы «Якутск–Нижний Бестях» с использованием автомобильного измерительного комплекса. Протяженность ледовой переправы – 13 км. При скорости передвижения измерительного комплекса до 20–25 км/ч по двум полосам время работы составило до 2 ч. Использование разработанного в ИГДС СО РАН программного обеспечения георадиолокационных ледомерных измерений позволило провести обработку данных в режиме реального времени, что немаловажно для оперативного контроля состояния ледовой переправы [2].

По результатам измерений получена карта распределения толщины речного льда по длине всей переправы и рассчитаны допустимые нагрузки на ледяной покров при пропуске по нему колесных автомобилей [1].

Обследование грунтовых дорог методом георадиолокации

Особое место в дорожном хозяйстве Республики Саха (Якутия) занимают типовые грунтовые автомобильные дороги. Некачественное технологическое состояние грунтовых дорог становится существенным тормозом в развитии объемов автомобильных перевозок, так как они не обеспечивают круглогодичное сообщение и

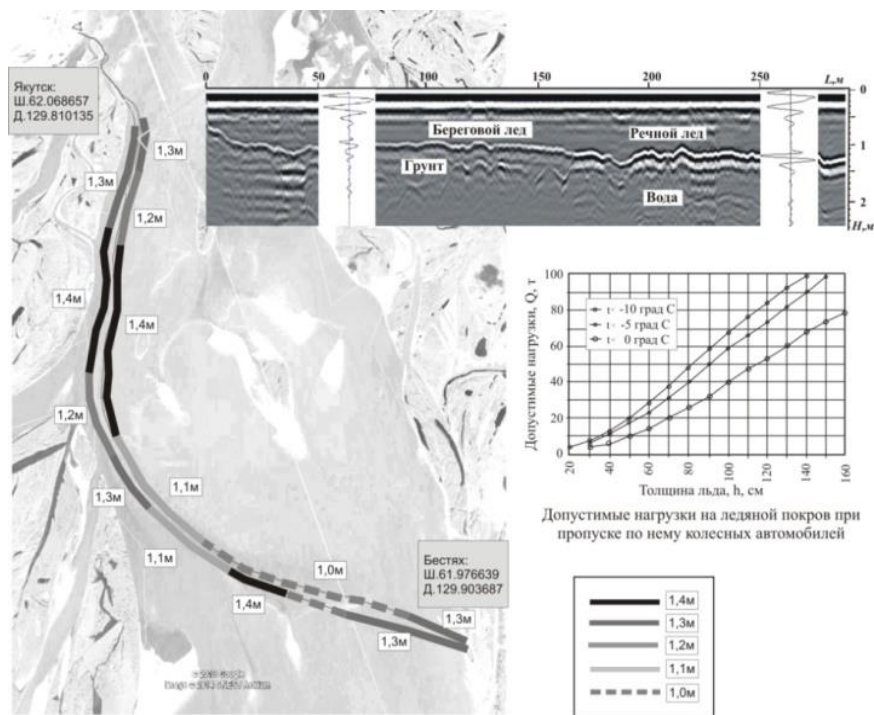
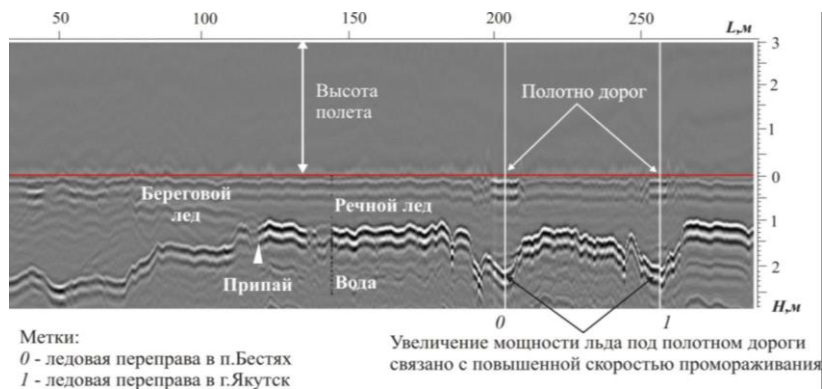


Рис. 3. Результат георадиолокационного зондирования ледовой переправы «Якутск–Н. Бестях»

не отвечают требованиям безопасности эксплуатации. В связи с этим возникают задачи дистанционного контроля качества укладки дорожного полотна и круглогодичный мониторинг зон, в которых возможны просадки и разрушения, обусловленные природно-климатическими условиями криолитозоны. Ряд некоторых задач, решаемых при исследовании грунтовых дорог в условиях распространения криолитозоны, изложен в работах [3, 4].

Исследования проведены на участке региональной автодороги «Амга» с целью исследования повышения эффективности диагностики и оценки состояния автомобильных дорог, эксплуатируемых в районах криолитозоны. По технологии работ для изучения криогенного состояния пород требуется свести до минимума вероят-

ность пропуска локальных неоднородностей (талики, криопэги, зоны разуплотнения, инженерные коммуникации и т.д.). Поэтому требования, предъявляемые к параметрам зондирования, принимаются на стадии изучения инженерно-геологических материалов и проведения рекогносцировочных работ.

Результаты исследований керна скважин показали, что физические свойства грунтов отсыпки практически неизменны на участке геофизических исследований. В основном дорожная отсыпка на протяжении всего участка дороги представлена в верхней части песчано-гравийной смесью от 0,2 до 0,5 м, ниже – супесями и суглинками до 3 м.

На данном участке автодороги работы проведены в зимнее время при промерзании сезонно-талого слоя, когда породы характеризуются минимальным поглощением электромагнитных волн, что создает оптимальные условия для их исследований. Результат исследований грунтовой дороги представлен на рис. 4. По данным камеральных работ пересчет георадиолокационного разреза в глубинный осуществлялся по средней скорости 0,122 м/нс, рассчитанной по сигналам-дифракциям на локальных неоднородностях [5]. Процесс обработки материалов измерений на исследуемом участке осуществлен по алгоритму: редактирование исходных данных, коррекция затухания амплитуд, подавление помех и ввод статистических поправок.

В результате на участке автодороги протяженностью 3,5 км изучено строение грунтов автодороги. По результатам работ выделены инженерные коммуникации, мощность конструктивных слоев дорожной одежды, а также участки с нарушением технологии отсыпки грунта.

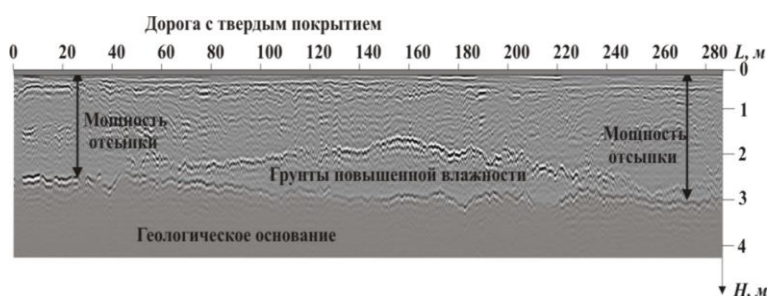


Рис. 5. Фрагмент георадиолокационного разреза автодороги «п.Н.Бестях – с.Майя» на участке деформации асфальтового покрытия

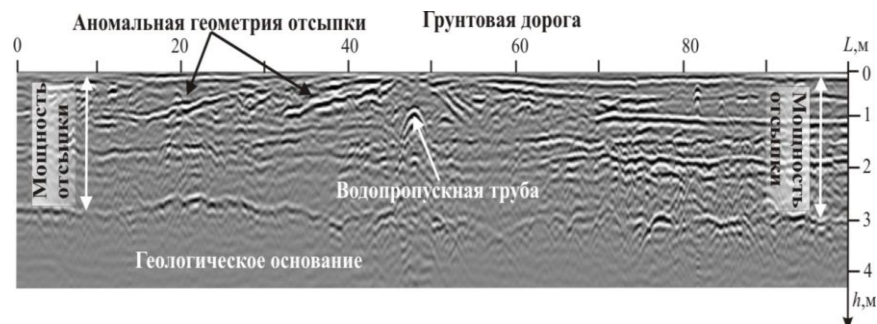


Рис. 4. Георадиолокационный профиль участка (фрагмент) грунтовой региональной автодороги «Амга»

Георадиолокационные измерения автодорог с твердым покрытием

В настоящее время для изучения автомобильных дорог и состояния подстилающих их грунтов традиционно применяют пенетрационные методы – это проходка шурфов и бурение скважин. Но в случае с асфальтовым покрытием ситуация осложняется тем, что не всегда можно подвести буровую к интересующему участку, возникают вопросы о целесообразности бурения через асфальтовое покрытие. Поэтому для изучения межскважинного пространства активно разрабатываются средства экспресс-анализа и неразрушающего контроля, к которым относятся дистанционные геофизические методы.

На рис. 5 представлен фрагмент георадиолокационного зондирования участка дороги «п. Нижний Бестях – с. Майя». По данным инженерных служб дотсыпка на этом участке достигает 3 м. Участок для исследований выбран по видимым деформациям поверхности асфальтового покрытия по расстоянию 120–200 м. По данным георадиолокации на участке от 60 м до 240 м выделена контрастная линза грунтов повышенной влажности. Участок дороги располагается на заболоченном месте, поэтому из-за миграции вод в этом месте ожидаются криогенные процессы и дальнейшая деформация асфальтового покрытия.

Для корректировки разреза применена процедура послойной обработки данных, позволяющая перейти к единому масштабу. По результатам обработки для уменьшения абсолютных погрешностей измерений и уточнения интерпретации произведены кусочная аппроксимация границ для вероятностных значений скорости распространения электромагнитного импульса $V = c / \sqrt{\epsilon'}$ (где c – скорость света, ϵ' – диэлектрическая проницаемость) и привязка к масштабу глубин. Так диэлектрическая

проницаемость увлажненных грунтов принята равной $\varepsilon'=40$ при $\varepsilon'=6-9$ для грунтов отсыпки. Особо следует отметить точность азимутальной привязки данных георадиолокационного профилирования и локализации выявленного слоя повышенной влажности по глубине распространения и простираия.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена целесообразность и доказана эффективность применения метода георадиолокации для обеспечения безопасности эксплуатации типовых автомобильных дорог криолитозоны. При этом, по данным георадиолокации, оперативно, с минимальным объемом заверочных работ, возможно определить толщины конструктивных слоев дорожной одежды, толщину льда в месте ледовых переправ, установить месторасположение подземных инженерных коммуникаций, выявить зоны повышенной влажности и разуплотнения грунтов земляного полотна, а также оценить другие опасные геологические процессы в грунтах оснований автомобильных дорог. Разработка технологии геофизического мониторинга на основе метода георадиолокации позволит повысить эффективность диагностики и оценки состояния автомобильных дорог, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера.

Работы выполнены в рамках НИР «Разработка системы геофизического мониторинга состояния грунтов оснований автомобильных дорог, эксплуатируемых в условиях криолитозоны» по Распоряжению Правительства Республики Саха (Якутия) от 27 августа 2014 г. №962-р «Об утверждении перечня научно-исследовательских работ на 2014–2016 годы».

Литература

1. ОДН 218.010-98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. – М.: ФДС России, 1998. – 47 с.
2. Федоров М.П. Георадиолокационная технология дистанционного мониторинга состояния ледяного покрова северных рек с борта летательного аппарата / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, М.П. Федоров // Защита населения и объектов от водной стихии северных рек: сборник докладов Общероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 28–29 июня 2013 г. – Якутск, 2013. – С.106 – 109.
3. Омеляненко А.В. Возможности георадиолокационного контроля качества строительства грунтовых автомобильных дорог в условиях криолитозоны / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: II Всероссийская научно-практическая конференция, г. Новокузнецк, 10–11 декабря 2010 г. – Новокузнецк: филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2010. – С. 8 – 12.
4. Саввин Д.В. Геофизический контроль состояния строения дорожного полотна в условиях криолитозоны / Д.В. Саввин, А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, О.А. Федоров // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы I Международной научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 25–26 ноября 2011 г. – Новокузнецк: филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2011. – С. 269 – 274.
5. Омеляненко А.В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.

Поступила в редакцию 01.10.2014

УДК. 629.3:621.4:66.6/7 (98)

Влияние качества топлива на надежность дизельных двигателей в условиях Севера

А.М. Ишков, Е.Л. Иовлева*

Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск

**Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск*

В результате проведенного анализа установлено, что при эксплуатации грузовых машин наименее надежным является двигатель. Отказы топливной аппаратуры составляют существенную часть отказов двигателя. Выходные параметры топливной аппаратуры непосредственно определяют характер рабочего процесса дизеля, его мощность, экономичность и надежность в эксплуатации. От-

ИШКОВ Александр Михайлович – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зав. отделом, a.m.ishkov@prez.ysn.ru; *ИОВЛЕВА Елизавета Лонгиновна – ст. преподаватель.

проницаемость увлажненных грунтов принята равной $\varepsilon'=40$ при $\varepsilon'=6-9$ для грунтов отсыпки. Особо следует отметить точность азимутальной привязки данных георадиолокационного профилирования и локализации выявленного слоя повышенной влажности по глубине распространения и простираия.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена целесообразность и доказана эффективность применения метода георадиолокации для обеспечения безопасности эксплуатации типовых автомобильных дорог криолитозоны. При этом, по данным георадиолокации, оперативно, с минимальным объемом заверочных работ, возможно определить толщины конструктивных слоев дорожной одежды, толщину льда в месте ледовых переправ, установить месторасположение подземных инженерных коммуникаций, выявить зоны повышенной влажности и разуплотнения грунтов земляного полотна, а также оценить другие опасные геологические процессы в грунтах оснований автомобильных дорог. Разработка технологии геофизического мониторинга на основе метода георадиолокации позволит повысить эффективность диагностики и оценки состояния автомобильных дорог, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера.

Работы выполнены в рамках НИР «Разработка системы геофизического мониторинга состояния грунтов оснований автомобильных дорог, эксплуатируемых в условиях криолитозоны» по Распоряжению Правительства Республики Саха (Якутия) от 27 августа 2014 г. №962-р «Об утверждении перечня научно-исследовательских работ на 2014–2016 годы».

Литература

1. ОДН 218.010-98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. – М.: ФДС России, 1998. – 47 с.
2. Федоров М.П. Георадиолокационная технология дистанционного мониторинга состояния ледяного покрова северных рек с борта летательного аппарата / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, М.П. Федоров // Защита населения и объектов от водной стихии северных рек: сборник докладов Общероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 28–29 июня 2013 г. – Якутск, 2013. – С.106 – 109.
3. Омеляненко А.В. Возможности георадиолокационного контроля качества строительства грунтовых автомобильных дорог в условиях криолитозоны / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: II Всероссийская научно-практическая конференция, г. Новокузнецк, 10–11 декабря 2010 г. – Новокузнецк: филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2010. – С. 8 – 12.
4. Саввин Д.В. Геофизический контроль состояния строения дорожного полотна в условиях криолитозоны / Д.В. Саввин, А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова, О.А. Федоров // Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы I Международной научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 25–26 ноября 2011 г. – Новокузнецк: филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2011. – С. 269 – 274.
5. Омеляненко А.В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.

Поступила в редакцию 01.10.2014

УДК. 629.3:621.4:66.6/7 (98)

Влияние качества топлива на надежность дизельных двигателей в условиях Севера

А.М. Ишков, Е.Л. Иовлева*

Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск

**Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск*

В результате проведенного анализа установлено, что при эксплуатации грузовых машин наименее надежным является двигатель. Отказы топливной аппаратуры составляют существенную часть отказов двигателя. Выходные параметры топливной аппаратуры непосредственно определяют характер рабочего процесса дизеля, его мощность, экономичность и надежность в эксплуатации. От-

ИШКОВ Александр Михайлович – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зав. отделом, a.m.ishkov@prez.ysn.ru; *ИОВЛЕВА Елизавета Лонгиновна – ст. преподаватель.

рицательные температуры окружающего воздуха оказывают влияние на повышение вязкости дизельного топлива, что и служит одной из причин выхода из строя дорогостоящих деталей системы питания. Нами рассмотрен вопрос применения дизельного топлива из нефти Талаканского месторождения. Изучены его физико-химические характеристики. Для улучшения низкотемпературных свойств полученного дизельного топлива были использованы депрессорные присадки. В результате было получено низкотемпературное дизельное топливо для дизельных двигателей автомобилей, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур.

Ключевые слова: надежность, дизельные двигатели, топливная аппаратура, отказы, дизельное топливо, качество, депрессорные присадки, низкотемпературные свойства.

As a result of the carried out analysis it is established that during operation of trucks the least reliable part is engine. Failures of fuel equipment are an essential part of engine failures. Output parameters of fuel equipment directly determine a character of a working process of a diesel engine, its power, efficiency and reliability. At negative air temperatures a diesel fuel viscosity increases which is one of the causes of failure of expensive parts of a system power supply. We have considered a question of application of diesel fuel from the Talakansky oil field. The physical and chemical characteristics of the fuel were studied. To improve low temperature properties of the resulting diesel fuel some depressant additives were used. As a result a low-temperature diesel fuel for diesel engines of vehicles operated at low climatic temperatures was obtained.

Key words: reliability, diesel engines, fuel injection equipment, failures, diesel fuel quality, depressant additives, low temperature properties.

Основными направлениями экономического и социального развития России предусматривается осуществить комплекс мероприятий на обеспечение эффективного вовлечения в хозяйственный оборот топливно-энергетических и минерально-сырьевых ресурсов восточных и северных регионов страны. Решение этих мероприятий требует привлечение огромного количества техники, которая должна работать в специфических природно-климатических, рельефно-дорожных, почвенных и других условиях эксплуатации в соответствии с установленными заводами-изготовителями параметрами применения этой техники. Суровые природно-климатические условия районов холодного климата (к ним относится Республика Саха (Якутия)) предъявляют повышенные требования к автотранспорту, эксплуатируемому в этом регионе. Это объясняется высокой маневренностью автомобильного транспорта, незначительными первоначальными капитальными вложениями на его применение. Недоучет специфики условий Севера приносит народному хозяйству огромный ущерб. Большая доля потерь в условиях Севера вызвана несоответствием используемой техники и эксплуатационных материалов требованиям эксплуатации.

Эффективность работы автомобиля определяется совместным влиянием всей совокупности его эксплуатационных свойств, в которой основными являются следующие: динамичность, топливная экономичность, устойчивость, управляемость, плавность хода, проходимость и надежность. Под эксплуатационными свойствами автомобиля понимают группу свойств, определяющих возможность его эффективного исполь-

зования, степень его приспособленности к эксплуатации в качестве транспортного средства.

Топливная экономичность характеризуется расходом топлива автомобилем в различных условиях, связанных с выполнением его работы по перевозке грузов или пассажиров, и является важным эксплуатационным свойством. Эксплуатация автомобилей в условиях холодного климата неизбежно связана с увеличением расхода топлива [1].

Расход топлива на Севере увеличивается не только из-за низких температур воздуха, но и из-за ухудшения структуры теплового баланса двигателя и баланса расхода энергии автомобилем. Дело в том, что, во-первых, часть энергии работающего двигателя расходуется на привод вспомогательных агрегатов специализированного автомобиля, во-вторых, неполнота сгорания топлива связана с ухудшением его испарения и распыливания; в-третьих, дальние рейсы и невозможность дозаправки по дороге вынуждают возить собой значительные запасы топлива; в-четвертых, несовершенство систем обеспечения запуска двигателя при низких температурах приводит к тому, что при кратковременных и даже длительных стоянках двигателя не глушатся, а работают, расходуя горючее. Нормативом предусмотрено увеличение нормы расхода топлива для автомобилей, работающих на Севере на 20–30%, но в ряде случаев, как показывает практика, и такого увеличения оказывается недостаточно. Таким образом, топливная экономичность является существенным фактором, влияющим на эффективность автомобилей на Севере.

Наиболее ответственным и, вместе с тем, наи-

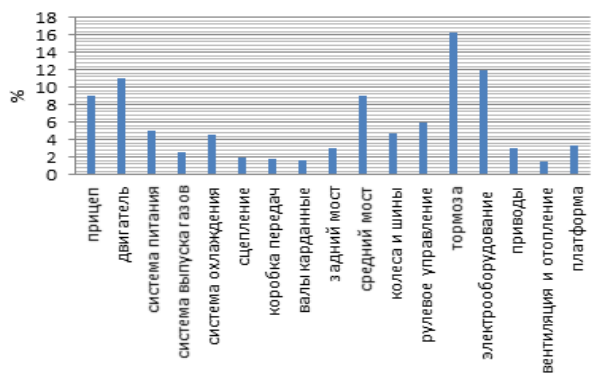


Рис. 1. Распределение числа отказов автомобиля КамАЗ

менее надежным является двигатель [1]. В свою очередь, топливная аппаратура представляет собой наиболее сложную и дорогую часть дизельного двигателя. Выходные параметры топливной аппаратуры непосредственно определяют характер рабочего процесса дизеля, его мощность, экономичность и надежность в эксплуатации. Отказы топливной аппаратуры составляют существенную часть отказов двигателя (рис.1), а так же времени простоев, связанных с устранением отказов (рис. 2) [1].

Анализ работоспособности дизельных автомобилей КамАЗ показал, что как для старых моделей, так и для их модернизированных модификаций зависимость влияния низких климатических температур сохраняется. Кроме того, из-за изменения свойств дизельного топлива наиболее сильное влияние отрицательные температуры оказывают на дорогостоящую топливную аппаратуру системы питания (табл. 1).

При обработке статистической информации для оценки функциональной зависимости влияния природно-климатических факторов на работоспособность системы питания мы использовали линейное уравнение регрессии, которое имеет следующий вид:

$$Y = B_2 + B_i X,$$

где X – фактор-аргумент, независимая случайная величина (в нашем случае температура окружающего воздуха); Y – фактор-функция, зависимая случайная величина; B_2 и B_i – коэффициенты уравнения регрессии.

Для примера на рис. 3 приведены результаты расчета зависимости числа отказов ТНВД от температуры эксплуатации.

Анализ показал, что число отказов ТНВД значительно увеличивается при понижении температуры окружающего воздуха (коэффициент корреляции $-0,80$). Количество отказов при отрицательной температуре более чем в 2,5 раза выше, чем при положительной. Зависимость числа отказов форсунок от низких температур (коэффициент корреляции $-0,79$) также показы-

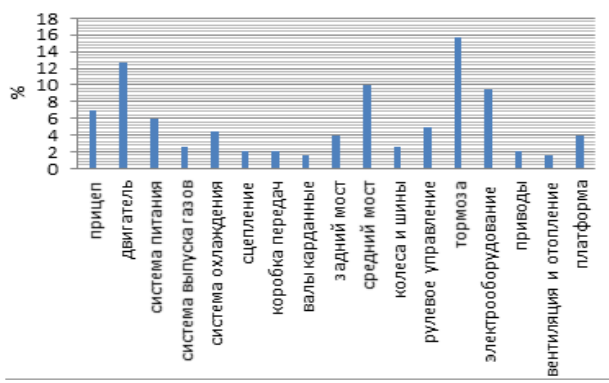


Рис. 2. Распределение времени простоев, связанных с устранением отказов автомобиля КамАЗ

Таблица 1

Распределение числа отказов деталей системы питания

Детали	Отказы, %
ТНВД	24
Бак	16,5
Форсунки	28,5
Топливная трубка	11,25
ТННД	10,12

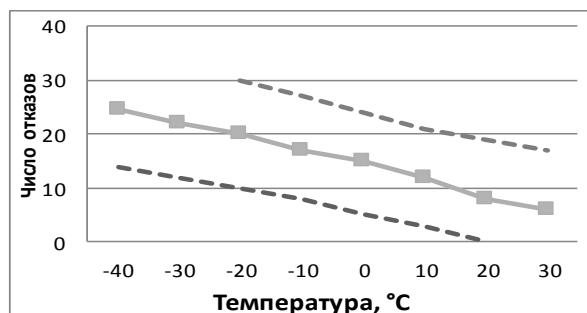


Рис. 3. Зависимость числа отказов ТНВД от температуры

вает существенное резкое увеличение числа отказов с понижением температуры. Низкие климатические температуры оказывают умеренное влияние на топливопроводы дизельных автомобилей (коэффициент корреляции $-0,53$). Увеличение числа отказов топливного бака с повышением температуры на наш взгляд связано с ухудшением дорог в летние время (появление колеи, рытвин, пучения дорожного полотна и др.) и, как следствие, повышенная вибрация и появление трещин в местах крепления бака.

Результаты расчета приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2

Зависимость числа отказов системы питания от природно-климатических факторов

Системы питания	Коэффициент корреляции, r	Вид функции распределения Y – число отказов, X – температура
ТНВД	-0,80	$Y = 14,65 - 0,25 \cdot X$
Форсунки	-0,79	$Y = 17,62 - 0,25 \cdot X$
Топливопроводы	-0,53	$Y = 6,93 - 0,10 \cdot X$
ТННД	-0,58	$Y = 6,34 - 0,07 \cdot X$
Топливный бак	0,50	$Y = 11,51 + 0,09 \cdot X$

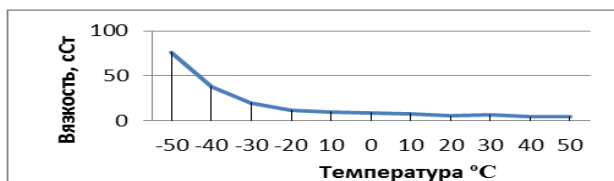


Рис. 4. Зависимость вязкости дизельного топлива марки ДА от температуры. (содержание серы 0,07%, цетановое число 40, температура застывания -60°C)

Для обеспечения надежной и экономичной работы дизельного двигателя дизельное топливо должно отвечать следующим требованиям: иметь хорошее смесеобразование и воспламеняемость; обладать соответствующей вязкостью, хорошей прокачиваемостью при различных температурах окружающего воздуха; содержать как можно меньше сернистых соединений, водорастворимых кислот и щелочей, механических примесей и воды [3]. Вязкость топлива влияет на процесс образования топливовоздушной смеси, а также на износ элементов топливной системы. На рис. 4 приведена зависимость вязкости дизельного топлива марки ДА от температуры.

Нижний предел вязкости топлива, при котором обеспечивается его высокая смазывающая способность, зависит от конструктивных особенностей топливной аппаратуры и условий ее эксплуатации. Вязкость топлива в пределах 1,8–7,0 мм²/с практически не влияет на износ плунжеров топливной системы дизелей.

Топливо с малой вязкостью дает более однородное и мелкое распыливание. Это способствует лучшему испарению, смесеобразованию и сгоранию. Однако слишком малая вязкость приводит к чрезмерным потерям топлива через зазоры в секциях топливного насоса, а также увеличивает интенсивное изнашивание деталей дизельной аппаратуры (плунжеров, гильз, нагнетательных клапанов секций топливного насоса, форсунок), которая смазывается топливом, кроме того, при чрезмерно низкой вязкости топлива капли при распыливании получаются очень мелкими, дальность их полета настолько уменьшается, что они концентрируются и сгорают в основном в непосредственной близости от форсунок, что приводит к их нагреву и быстрому выходу из строя [4].

Отрицательные температуры окружающего воздуха оказывают существенное влияние на повышение вязкости дизельного топлива, что и служит основным фактором выхода из строя дорогостоящих деталей системы питания. Для применения дизельного топлива при эксплуатации техники в условиях низких температур оно должно обладать низкотемпературными свойствами.

К настоящему времени низкотемпературное дизельное топливо получают следующими способами [5]:

- снижение конца его кипения, т.е. удаление из него высокоплавких парафиновых углеводородов;
- использование процесса карбамидной, цеолитной и микробиологической депарафинизации, т.е. снижение общего содержания парафиновых углеводородов;
- применение процессов гидрокрекинга, крекинга-гидроизомеризации, каталитической депарафинизации, позволяющих превращать парафиновые углеводороды в углеводороды других классов, расщеплять и изомеризовать их;
- применение специально синтезированных депрессорных присадок.

Наиболее простой и самый распространенный способ получения низкозастывающих зимних и арктических дизельных топлив – облегчение их фракционного состава на установках прямой перегонки нефти.

На втором месте по объему производства низкозастывающих дизельных топлив стоял процесс депарафинизации на цеолитах, в частности «Парекс». В его основу положено селективное извлечение цеолитами *n*-парафиновых углеводородов, которые используются в микробиологическом синтезе кормовых белков [6].

Одним из наиболее экономичных и перспективных способов улучшения низкотемпературных свойств дизельных топлив является применение высокоэффективных депрессорных присадок, которые нашли широкое применение практически во всех странах Западной Европы, США, Японии, Канады и др. Ведущие химические концерны предлагают на рынок различные депрессорные присадки [5].

Добавка депрессорных присадок к топливам дает возможность не только улучшить их низкотемпературные свойства, но и увеличить выход среднестиллятных топлив за счет повышения конца их кипения. Работоспособность топлива с добавленными депрессорными присадками не ухудшается.

Депрессорные присадки представляют собой растворы активного вещества (т.е. вещества, непосредственно обеспечивающего депрессорные свойства) в органическом растворителе [7].

Одним из способов повышения эффективности работы автомобилей является применение дизельного топлива, получаемого из месторождений, находящихся на территории Республики Саха (Якутия)

В настоящее время в Республике Саха (Якутия) активно разрабатывается Талаканское месторождение нефти. Нами исследованы образцы дизельного, топлива полученного из Талакан-

Таблица 3

Физико-химические свойства дизельного топлива, полученного из Талаканской нефти

Показатели	Полученные значения
Цетановое число	50
Фракционный состав: 50 % перегоняется при температуре, °С, не выше	240
96 % перегоняется при температуре (конец перегонки), °С, не выше	340
Кинематическая вязкость, мм ² /с (сСт)	2,798
Массовая доля серы, %, не более, в топливе	0,2
Испытание на медной пластинке	Выдерживает
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствует
Концентрация фактических смол, мг на 100 см ³ топлива, не более	24,7
Коксуемость, 10 %-го остатка, %, не более	0,7
Содержание механических примесей	Отсутствует
Содержание воды	—
Плотность кг/м ³ , не более	816
Температура помутнения, °С	-17
Температура застывания, °С	-28
Предельная температура фильтруемости, °С	-17
Кислотность, мг КОН на 100 см ³	1,94
Йодное число, г йода на 100 г топлива	1,12

ской нефти, отобранной из трубы ВСТО. Фракционный состав дизельного топлива определяли по методике ГОСТ 2177-99.

По физико-химическим свойствам эта нефть относится к классу легких и средних: плотность равна 812 кг/м³. По содержанию серы средние сернистые от 0,36 % мас. Содержание смол от 8,11 % мас., содержание асфальтенов достигает 0,15% мас.

Нами была получена дизельная фракция в интервале от 180 до 280°С, характеристики дизельной фракции, полученной из Талаканского месторождения, приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, полученная нами дизельная фракция относится к летнему сорту топлива по ГОСТ 305-82. Температура застывания равняется -28°С, предельная температура фильтруемости равняется -17°С. Фракция с достаточно хорошим показателем цетанового числа (50 ед.) с умеренной плотностью и вязкостью.

С учетом природно-климатических условий эксплуатации техники на Севере основными показателями для низкотемпературного дизельного топлива из Талаканской нефти были выбраны:

- предельная температура фильтруемости,
- температура застывания.

Для улучшения показателей дизельного топлива были использованы депрессорные присадки Difron315, Keroflux 6100, деспергатор парафинов Keroflux 3614 и депрессорно-деспер-

гирующие Difron 3312. Присадки добавлялись в различных концентрациях (от 0,01 до 0,7% мас. дол.). По рекомендациям производителя присадка вводилась в топливо, разогретое до 40°С. Предельная температура фильтруемости определялась по ГОСТ 22254-92 «Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре» на приборе «Автоматический аппарат для определения предельной температуры фильтруемости ПТФ-ЛАБ-11». Температура застывания определялась по ГОСТ 20287-91 «Температура застывания. Метод Б.» на приборе «Криотермостаты

Таблица 4

Низкотемпературные свойства дизельной фракции из Талаканской нефти с депрессорной присадкой Keroflux 6100

Проба	Концентрация присадки, % мас. дол.	Показатели	
		температура застывания, °С	предельная температура фильтруемости, °С
Без присадки	-	- 28	-17
1	0,10	-36	-20
2	0,20	-39	-25
3	0,50	- 35	-24

Таблица 5

Низкотемпературные свойства дизельной фракции из Талаканской нефти с деспергатором парафинов Keroflux 3614 и депрессорной присадкой Keroflux 6100

Проба	Концентрация присадки, % мас. дол.		Показатели	
			температура застывания, °С	предельная температура фильтруемости, °С
	Keroflux 6100	Keroflux 3614		
Без присадки	-	-	- 28	-17
1	0,1	0,6	-44	-24
2	0,2	0,6	-47	-26
3	0,5	0,6	- 34	-23

Таблица 6

Низкотемпературные свойства дизельной фракции из Талаканской нефти с депрессорной присадкой Difron315

Проба	Концентрация присадки, % мас. дол.	Показатели	
		температура застывания, °С	предельная температура фильтруемости, °С
Без присадки	-	- 28	-17
1	0,1	-45	-33
2	0,2	-46	-33
3	0,4	- 47	-34
4	0,45	-48	-35
5	0,5	-51	-38
6	0,55	-53	-39
7	0,6	-50	-31
8	0,7	-39	-34

Таблица 7

Низкотемпературные свойства дизельной фракции из Талаканской нефти с депрессорно-диспергирующей присадкой Difron 3312

Проба	Концентрация присадки, % мас.дол.	Показатели	
		температура застывания, °С	предельная температура фильтруемости, °С
Без присадки	-	- 28	-17
1	0,02	-31	-27
2	0,05	-33	-28
3	0,1	-36	-31

жидкостные серии LOIP FT (FT-311-80)». Результаты лабораторных исследований представлены в табл. 4–7.

Выводы

Надежность и долговечность техники зависят от качества применяемого топлива. Низкокачественное дизельное топливо может стать причиной преждевременного износа и выхода из строя топливного насоса и форсунок, снижения подачи топлива, изменения момента начала подачи в сторону запаздывания, ухудшения качества распыления топлива.

При эксплуатации в условиях низких температур происходит существенное изменение свойств применяемых горюче-смазочных материалов, теплового режима работы двигателя, агрегатов и систем автомобиля. В результате работоспособность транспортных машин снижается в 1,3–2,5 раза, выработка на 20–30%, суммарные простои увеличиваются на 30–50% и

как следствие возрастает себестоимость перевозок.

Применение депрессорной присадки Difron315 (концентрация присадки в % мас.дол. 0,55) улучшает свойства топлива, полученного из Талаканской нефти, ее температура застывания –53°С, предельная температура фильтруемости –39°С, что позволяет использовать это топливо при эксплуатации в условиях низких климатических температур.

Литература

1. Ишков А.М. Математическая ритмология в работоспособности техники на Севере. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. – 320 с.
2. Ишков А.М., Кузьминов М.А., Зудов Г.Ю. Теория и практика надежности техники в условиях Севера. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 313 с.
3. Агаев С.Г., Глазунов А.М., Гулятьев С.В. Улучшение низкотемпературных свойств дизельных топлив. – Тюмень, 2009. – С.151.
4. Сафонов А.С., Ушаков А.И. Автомобильные топлива: химмотология. Эксплуатационные свойства. – СПб.: НПИКЦ, 2002. – С.243.
5. Митусова Т.Н. Новые требования к качеству дизельных топлив // Нефтехимия и нефтепереработка. – 2000. – № 1. – С. 19–21.
6. Получение низкозастывающих дизельных топлив из денормализаторов процесса Парекс / Б.А. Энглин, В.Г.Николаева, Т.Н.Митусова и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. –1978. –№ 1. –С.1–4.
7. Тертерян Р.А. Депрессорные присадки к нефтям, топливам и маслам. – М.: Химия, 1990. – 238 с.

Поступила в редакцию 26.08.2014

УДК 621.785:621.947.2

Применение лазерной резки для изготовления корпуса хомуса (варган) из листовой стали

М.П. Лебедев, С.Н. Махарова, С.П. Яковлева, А.Р. Александров*

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

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

Представлен запланированный цикл статей, посвященных материаловедческим исследованиям металлических изделий современной национальной культуры, а также орудий труда, предметов вооружения и быта, изготовленных в прошлом местными кузнецами. Эти исследования проводятся в порядке оказания технической помощи народным мастерам, краеведам, исследователям металлургии

ЛЕБЕДЕВ Михаил Петрович – д.т.н., член-корр. РАН, директор administration@iptpn.ysn.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с., snmachar@mail.ru; ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отделом, spyakovleva@yandex.ru; *АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович – н.с.

Таблица 7

Низкотемпературные свойства дизельной фракции из Талаканской нефти с депрессорно-диспергирующей присадкой Difron 3312

Проба	Концентрация присадки, % мас.дол.	Показатели	
		температура застывания, °С	предельная температура фильтруемости, °С
Без присадки	-	- 28	-17
1	0,02	-31	-27
2	0,05	-33	-28
3	0,1	-36	-31

жидкостные серии LOIP FT (FT-311-80)». Результаты лабораторных исследований представлены в табл. 4–7.

Выводы

Надежность и долговечность техники зависят от качества применяемого топлива. Низкокачественное дизельное топливо может стать причиной преждевременного износа и выхода из строя топливного насоса и форсунок, снижения подачи топлива, изменения момента начала подачи в сторону запаздывания, ухудшения качества распыления топлива.

При эксплуатации в условиях низких температур происходит существенное изменение свойств применяемых горюче-смазочных материалов, теплового режима работы двигателя, агрегатов и систем автомобиля. В результате работоспособность транспортных машин снижается в 1,3–2,5 раза, выработка на 20–30%, суммарные простои увеличиваются на 30–50% и

как следствие возрастает себестоимость перевозок.

Применение депрессорной присадки Difron315 (концентрация присадки в % мас.дол. 0,55) улучшает свойства топлива, полученного из Талаканской нефти, ее температура застывания –53°С, предельная температура фильтруемости –39 °С, что позволяет использовать это топливо при эксплуатации в условиях низких климатических температур.

Литература

1. Ишков А.М. Математическая ритмология в работоспособности техники на Севере. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. – 320 с.
2. Ишков А.М., Кузьминов М.А., Зудов Г.Ю. Теория и практика надежности техники в условиях Севера. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 313 с.
3. Агаев С.Г., Глазунов А.М., Гулятьев С.В. Улучшение низкотемпературных свойств дизельных топлив. – Тюмень, 2009. – С.151.
4. Сафонов А.С., Ушаков А.И. Автомобильные топлива: химмотология. Эксплуатационные свойства. – СПб.: НПИКЦ, 2002. – С.243.
5. Митусова Т.Н. Новые требования к качеству дизельных топлив // Нефтехимия и нефтепереработка. – 2000. – № 1. – С. 19–21.
6. Получение низкозастывающих дизельных топлив из денормализаторов процесса Парекс / Б.А. Энглин, В.Г.Николаева, Т.Н.Митусова и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. –1978. –№ 1. –С.1–4.
7. Тертерян Р.А. Депрессорные присадки к нефтям, топливам и маслам. – М.: Химия, 1990. – 238 с.

Поступила в редакцию 26.08.2014

УДК 621.785:621.947.2

Применение лазерной резки для изготовления корпуса хомуса (варган) из листовой стали

М.П. Лебедев, С.Н. Махарова, С.П. Яковлева, А.Р. Александров*

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

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

Представлен запланированный цикл статей, посвященных материаловедческим исследованиям металлических изделий современной национальной культуры, а также орудий труда, предметов вооружения и быта, изготовленных в прошлом местными кузнецами. Эти исследования проводятся в порядке оказания технической помощи народным мастерам, краеведам, исследователям металлургии

ЛЕБЕДЕВ Михаил Петрович – д.т.н., член-корр. РАН, директор administration@iptpn.ysn.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с., snmachar@mail.ru; ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отделом, spyakovleva@yandex.ru; *АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович – н.с.

ческой культуры якутов. Якутские хомусы пользуются особой популярностью, и возникает необходимость серийного выпуска качественных «певучих» хомусов с использованием современных технологий металлообработки. В связи с этим в данной работе рассмотрены металлургические аспекты применения лазерной резки для ускорения процесса изготовления заготовки корпуса хомуса. Исследовано влияние лазерной резки на структуру металла корпуса хомуса. Проведен сравнительный анализ изменения микроструктуры и микротвердости у поверхности реза металла корпуса хомуса после лазерной и механической резки. Определена толщина зоны лазерного воздействия. Установлено, что для резки заготовок корпуса хомусов можно использовать лазерную резку, обеспечивающую высокую производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза.

Ключевые слова: листовая сталь, заготовка корпуса хомуса, лазерная резка, металлографический анализ, микроструктура, микротвердость.

The present work opens a planned series of articles devoted to materials research of metal products of modern national culture, instruments of work, weapons and household items made in the past by local blacksmiths. These studies are conducted in order to provide technical assistance to national masters, local historians, researchers of a metallurgical culture of the Yakuts. Yakut khomuses are very popular and there is a need of serial production of quality "melodious" khomuses using modern technologies of metal processing. In this context, this paper discusses metallography aspects of the application of laser cutting to accelerate a process of manufacturing a workpiece of khomus body. Influence of laser cutting on metal structure of khomus body was investigated. A comparative analysis of changes in the microstructure and microhardness of a cut surface of metallic khomus body after laser and mechanical cutting is conducted. The thickness of a laser affected zone is defined. It is established that for cutting workpieces of khomus body it is possible to use a laser cutting, which provides high efficiency of the process in combination with high quality of cut surfaces.

Key words: sheet steel, workpiece of khomus body, laser cutting, metallographic analysis, microstructure, microhardness.

Введение

Академик В.П. Ларионов всегда поддерживал народных мастеров-изготовителей, кузнецов и не переставал удивляться, восхищаться их чувству металла, природному таланту: «Как специалист по металлам, которого к работе с металлами обучали специально более пяти лет, а затем более четверти века занимающемуся исследованиями металлов, я не перестаю удивляться и восхищаться чувству металла, природному таланту, граничащему в области обработки металлов с волшебством, — наших мастеров-умельцев, якутских кузнецов» [1]. Эта инициатива В.П. Ларионова продолжается его преемниками и учениками. В порядке оказания технической помощи народным мастерам, краеведам, исследователям металлургической культуры якутов изучены технологические вопросы изготовления металлических изделий современной национальной культуры, а также орудий труда, предметов вооружения и быта, выкованных местными кузнецами прошлых столетий. Принято решение подготовить цикл статей, посвященных материаловедческим исследованиям изготовления металлических объектов национальной культуры и быта.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к якутской хомусной музыке, по мнению знатоков варганного искусства, лучшими в мире считаются якутские хомусы. В связи с

этим якутские хомусы пользуются особой популярностью, и остро стоит вопрос об увеличении количества качественных «певучих» инструментов, т.е. речь идёт о необходимости серийного выпуска хомусов с использованием современных технологий металлообработки.

В данный момент продолжают работы по усовершенствованию технологических процессов изготовления хомуса, в частности, по ускорению процесса изготовления заготовки корпуса хомуса с помощью лазерной резки. Однако внедрение этой технологии в процессе изготовления хомуса требует проведения предварительного комплекса исследования влияния воздействия лазерного луча на структуру материала, подвергаемого лазерной резке. В связи с этим целью данной работы явилось исследование влияния лазерной резки на структуру металла корпуса хомуса в зоне реза.

Краткие сведения о технологиях изготовления корпуса хомуса. Якутский хомус – разновидность варгана, состоит из двух частей: корпус имеет вид кольца с двумя прямыми концами, которые имеют четыре грани, называемые внутренними и внешними щечками. Между ними расположен язычок, который имеет колено и закругленный кончик. Основным требованием, предъявляемым к корпусу хомуса, является его достаточная прочность и массивность кольца для того, чтобы сделать к нему надежное крепление язычка.

Традиционная технология изготовления корпуса хомуса. Корпусы хомуса по традиционной технологии изготавливаются путем ручнойковки, при этом подразделяются на кованые (выковывается форма корпуса хомуса), полукованные (выковывается заготовка, которую впоследствии изгибают, придавая необходимую форму) и гнутые (металлический прут изгибается до требуемой формы). В результатековки на поверхности заготовки остаются следы ударных и подкладных инструментов, такая поверхность требует выравнивания. Дальнейшие операции по формированию внутренних и внешних шёк корпуса хомуса производятся вручную с помощью напильников. Опиливанием достигаются требуемые размеры, форма и шероховатость поверхностей обрабатываемой заготовки корпуса хомуса. Таким образом, традиционная технология изготовления корпуса хомуса выполняется вручную, является трудоемким и длительным процессом.

Технология изготовления корпуса хомуса из листовой стали. В 1997 г. мастер-изготовитель хомуса И.Н. Готовцев разработал авторскую станочную технологию изготовления корпуса хомуса из листовой стали [2]. Технология состоит из нескольких технологических и вспомогательных операций, выполняемых на металло-режущих станках: нарезание прямоугольных пластин из листовой стали на гильотине; сверление и рассверливание на токарных станках кольца корпуса хомуса; нарезание на фрезерном станке центрального канала под язычок. Придание окончательной формы корпуса хомуса производится на электроточиле или с помощью ножовки. При этом каждая поверхность реза требует дополнительной обработки: опиление, шлифование, полирование. В связи с этим доводка чистоты поверхности производит-

ся вручную с помощью напильников, абразивных шкур различной зернистости. Таким образом, данная технология позволяет механизировать процесс изготовления заготовки корпуса хомуса, придать корпусу декоративную фигурную форму по дизайну мастера. Однако при многих достоинствах этого процесса существуют значительные недостатки, связанные с низкой производительностью, высокой стоимостью отрезного инструмента, трудностью или невозможностью раскроя материалов по сложному криволинейному контуру.

В настоящее время Готовцев И.Н. для автоматизации и ускорения процесса изготовления корпуса хомуса предложил применить лазерную резку. Лазерная резка металла основана на принципе концентрации лазерного луча на поверхности обрабатываемой детали. Луч лазера (генератора мощного оптического излучения) концентрируется на поверхности детали на площади, исчисляемой квадратными микронами и создает область повышенной температуры (рис. 1, а). В результате поверхность металла разогревается, расплавляется и испаряется. Как правило, лазерная головка, управляемая компьютером станка, перемещается над поверхностью обрабатываемого металла (рис. 1, б). Металл, независимо от жёсткости и толщины, может быть разрезан по сложному контуру с высочайшей точностью, недостижимой при механической обработке – до 0,05–0,08 мм. При лазерной резке отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал и возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания [3]. При этом можно получить идеальную поверхность реза с минимальной зоной термического влияния.

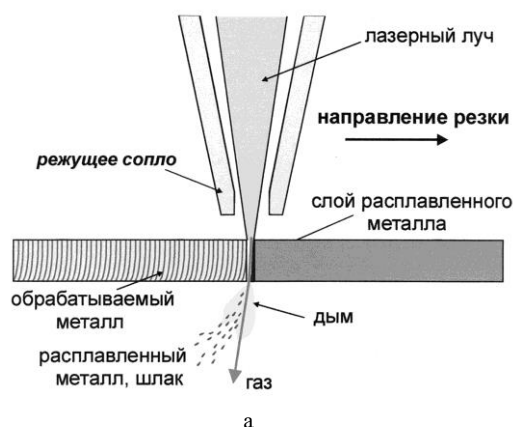


Рис. 1. Схема процесса (а) и применение технологии лазерной резки в изготовлении корпуса хомуса (б)

Материал и методы исследования. Объект исследования – заготовка корпуса хомуса (варгана), изготовленная народным мастером И.Н. Готовцевым по разработанной им станочной технологии с применением лазерной резки.

Лазерная резка заготовок корпуса хомуса проведена на автоматизированном лазерном технологическом комплексе Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН.

На рис. 2 показана заготовка корпуса хомуса, изготовленная лазерной резкой, штриховыми линиями отмечены области вырезки образцов для металлографических исследований. Стрелкой показано место механического реза пилой-ножовкой, выполненного для проведения сравнительного анализа изменений структуры металла в результате воздействия лазера и традиционного способа подготовки корпусов хомусов.

Для исследования микроструктуры были изготовлены поперечные шлифы – образцы разрезали перпендикулярно поверхности реза. При подготовке поперечных шлифов во избежание «заваливания» наружной и внутренней кромок образцов при шлифовании и полировании, все они были установлены в полые цилиндрические «державки» и залиты сплавом Вуда. Далее шлифование проводили на наждачной бумаге в порядке убывания зернистости, полирование – алмазной пастой. Составляющие структуры выявляли травлением в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Для определения химического состава листового металла использован спектрометр «Foundry-master». Среднее значение содержания химических элементов получено по результатам трех измерений.

Изучение микроструктуры проведено методами оптической микроскопии с помощью металлографических микроскопов «Neophot-32» и «Axio Observer D1».

Значения микротвердости замерены на приборе «ПМТ-3М» при нагрузке на индентор 0,5 Н и времени выдержки 10 с.

Результаты и обсуждение. *Химический состав металла.* В таблице представлены результаты спектрального анализа металла хомуса, представляющего собой углеродистую сталь обыкновенного качества марки Ст3сп (также приведен состав этой стали по ГОСТ 380-94).

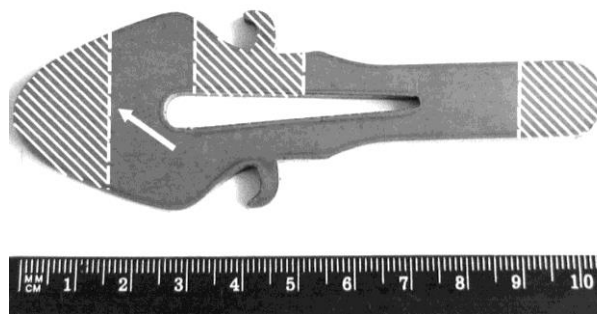


Рис. 2. Схема вырезки образцов: пунктирной линией отмечены места вырезки образцов для исследований; стрелкой – место механического реза (ножовочным полотном)

Сталь углеродистая обыкновенного качества выпускается в виде проката (прутки, балки, листы, трубы и т.п.). Сталь марки Ст3сп широко применяется в строительстве для изготовления металлоконструкций.

Микроструктура и глубина зоны воздействия лазера. Основная структура корпуса хомуса имеет обычное для стали Ст3 ферритно-перлитное строение, размер зерна соответствует 7–8 баллам, микротвердость ~1510 МПа.

При лазерной резке поверхностный слой металла практически мгновенно нагревается и столь же мгновенно охлаждается, что приводит к возникновению в приповерхностной зоне закалочных структур повышенной твердости (до 3570 МПа); далее располагается мелкозернистая зона, переходящая в зону основной структуры металла корпуса (рис. 3, а). Глубина зоны воздействия лазера ~ 0,5 мм.

Микроструктура металла хомуса при механическом способе резки не претерпевает су-



Рис. 3. Микроструктура металла под поверхностью лазерного реза (а) и под поверхностью механического реза (б), x250

Химический состав металла корпуса хомуса

Материал	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Fe
Образец корпуса хомуса	0,15	0,20	0,46	0,015	0,06	0,02	0,02	0,08	Ост.
Ст3сп (ГОСТ 380-94)	0,14–0,22	0,15–0,30	0,40–0,65	≤0,30	≤0,30	≤0,04	≤0,05	≤0,30	– // –

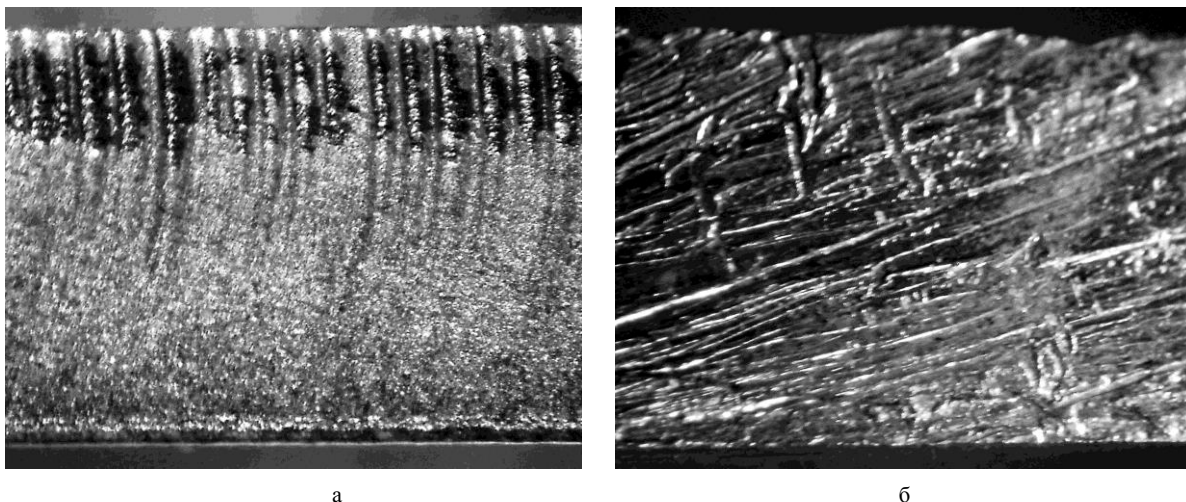


Рис. 4. Качество поверхности реза после лазерной резки (а) и после механической резки (б)

пещественных изменений (рис. 3,б), что подтверждается значениями микротвердости, которая у поверхности реза и по глубине образца сохраняется неизменной и составляет ~ 1510 МПа.

Поверхности реза. Поверхность лазерного реза корпуса хомуса имеет обычную для этого вида металлообработки чётко выраженную и относительно равномерную бороздчатую структуру (рис. 4), что свойственно лазерной резке на невысокой скорости (менее 2,5 м/мин). При увеличении скорости лазера линия реза получается более гладкой и ровной.

Как уже отмечалось выше, лазерная резка позволяет получать достаточно чистые кромки реза, т.е. не требуется дополнительная обработка его поверхности. В результате общий цикл изготовления корпуса хомуса значительно сокращается.

Выводы

Исследованный корпус хомуса, при изготовлении которого применена контурная лазерная резка, выполнен из углеродистой стали марки СтЗсп. Размер зерна стали соответствует 7–8 баллам, микротвердость ≈ 1510 МПа.

При механической резке ножовочным полотном заметных структурных изменений металла заготовок корпуса хомуса не выявлено, что подтверждается значениями микротвердости: микротвердость у поверхности реза и по глубине образца сохраняется неизменной, составляя 1510 МПа.

В отличие от механического способа изготовления корпуса хомуса, при использовании лазерной технологии у поверхности лазерного реза образуются закалочные структуры повышенной твердости: микротвердость этих участков

более чем в 2 раза выше исходной (3570 МПа против 1510 МПа). При использованном режиме лазерной резки заготовок корпуса хомусов глубина зоны воздействия лазера составила $\sim 0,5$ мм.

Таким образом, предложенная народным мастером И.Н. Готовцевым станочная технология изготовления корпусов хомусов с применением контурной лазерной резки обеспечила получение поверхностей реза достаточного качества в сочетании с высокой производительностью технологического процесса. Вопрос оценки акустических качеств – влияет ли упрочнение контура корпуса при лазерной резке на звучание хомуса? – остается открытым для обсуждения самими мастерами-изготовителями и исполнителями-импровизаторами.

Авторы выражают искреннюю благодарность за содействие в изготовлении заготовок корпуса хомуса лазерной резкой: академику РАН В.М. Фомину, д.ф.-м.н., директору Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, проф. А.М. Оришчу, д.ф.-м.н., зам. директора по научной работе Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Литература

1. Ларионов В.П. Технические возможности изготовления хомуса на современном этапе // Материалы I Всесоюзной конференции «Варган (хомус) и его музыка». – Якутск: Полиграфист, 1991. – С. 93–101.
2. Готовцев И.Н. Новые технологии якутского хомуса. – Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003. – 64 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.

Поступила в редакцию 31.01.2014

Металлургия и материаловедение

УДК 620.191.33

Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение

В.С. Ачикасова, В.В. Лепов

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

С целью анализа процессов накопления повреждений и разрушения ОЦК-сталей при низких температурах исследовано явление вязкохрупкого перехода. Для выявления механизма микроструктурных изменений, происходящих при низкотемпературном вязкохрупком переходе, применен метод внутреннего трения. Впервые показано, что это явление не связано, как полагали ранее, с межатомным взаимодействием, а обусловлено флуктуациями на очагах разрушения в виде микротрещин и дальнейшим их ростом по дислокационному механизму, при этом разрыв связей происходит при неупругом рассеянии фононов и под действием растягивающих напряжений. В дальнейшем планируется использовать выявленный механизм для численного моделирования процессов разрушения сталей и сплавов, находящихся в поликристаллическом и наноструктурном состоянии.

Ключевые слова: внутреннее трение, накопление повреждений, механизм разрушения, низкие температуры, вязкохрупкий переход.

A ductile-brittle transition phenomenon has been studied to analyze the damage nucleation processes in BCC metal at low temperatures. The internal friction method was applied to reveal the mechanism of dislocation microstructure changes during the low-temperature ductile-brittle transition. It has been shown for the first time that the transition is not connected with interatomic interactions but is stipulated by thermofluctuations on the fracture nuclei such as microcracks and by their further dislocation growth. The bond breakages occurred by the inelastic scattering of phonons and under the applied tension stress. From now on, it is supposed to apply the proposed mechanism for theoretical and numerical modeling of damage and fracture for polycrystalline and nanostructured steel and alloys.

Key words: internal friction, damage nucleation, fracture mechanism, low temperatures, ductile-brittle transition.

Известно, что при эксплуатации в условиях низких климатических температур часто происходит катастрофическое хрупкое разрушение элементов конструкций и деталей машин. Наиболее подвержены охрупчиванию при низких температурах конструкционные материалы, имеющие объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку, в первую очередь железо и многие конструкционные стали. Для таких материалов присуще такое известное явление как вязкохрупкий переход, которое характеризуется резким снижением пластических свойств. При этом происходит изменение характера разрушения от вязкого к хрупкому [1].

Многообразие явления вязкохрупкого перехода отражается факторами, влияющими на тип

разрушения, как внутренними, так и внешними. При этом химический состав и структура материала отражают физическую природу явления, а скорость нагружения, температура, вид напряженно-деформированного состояния и размер конструкции – механическую.

Для металлов и сплавов с ОЦК-решеткой, применяемых в конструкциях для низких климатических температур, в исследуемой области температур наблюдается вязкохрупкий переход, определяемый ударными испытаниями. Необходимо отметить, что до настоящего времени нет четко выясненного структурного механизма процесса, происходящего в интервале вязкохрупкого перехода «...теория вязкохрупкого перехода должна учитывать радикальное изменение дислокационной структуры вблизи $T = T_{кр}$, изменение энергоемкости излома, вида и характера пластической зоны и т.д.» [2].

Метод внутреннего трения является одним из самых чувствительных методов при исследова-

АЧИКАСОВА Валентина Семёновна – вед. инженер-электронщик, e-mail: achikasova@iptpn.ysn.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. директора, e-mail: leprov@iptpn.ysn.ru.

нии тонкой структуры металлов и сплавов. Измерения характеристик внутреннего трения производят в широком диапазоне частот. Измерения в области вязкохрупкого перехода материалов с ОЦК-решеткой удобно проводить при низких частотах (порядка несколько герц), т.к. внутреннее трение чувствительно к различного рода нарушениям и перестройкам структуры на уровне кристаллической решетки и поэтому часто используется исследователями для изучения реальной дефектной структуры кристаллов.

В настоящей работе измерения внутреннего трения проведены широко применяемым для динамического механического анализа металлических материалов методом свободных крутильных колебаний [3,4]. В качестве реализации метода использован обратный крутильный маятник. Нижний конец исследуемого образца, в наших экспериментах имеющего форму проволоки, закреплялся неподвижно, а верхний конец жестко соединялся с инерционной деталью, подвешенной на торсионах. В системе возбуждались крутильные колебания. После устранения вынуждающей силы маятник совершал затухающие колебания, измерение основных параметров которых (в нашем случае изменение амплитуды колебаний, т.е. число колебаний) позволяло вычислить вязкоупругие характеристики исследуемого образца материала.

В качестве исследуемого материала в данном случае выбрана конструкционная сталь 09Г2. Данный материал имеет ОЦК-решетку, для которого характерен низкотемпературный вязкохрупкий переход. Исследовались проволоочные образцы диаметром 1 мм с рабочей длиной порядка 10 см. Задавалась относительная деформация порядка 10^{-5} при частоте колебания маятника 1 Гц.

Величину внутреннего трения определяли по формуле [4]:

$$Q^{-1} = \frac{\ln K}{\pi n},$$

где Q^{-1} – величина, обратная механической добротности; n – число колебаний в пределах уменьшения амплитуд колебаний от A_n до A_m ;

$K = \frac{A_n}{A_m}$ – число, показывающее, во сколько раз уменьшается начальная амплитуда A_n за n колебаний.

Проведены измерения температурной зависимости внутреннего трения закаленного и отожженного образцов данного материала в интервале температур 100÷300 К.

На температурной кривой внутреннего трения исследуемой стали наблюдается максимум

в интервале ~ 160÷240 К (рис.1). Высота максимума закаленного образца выше, чем у отожженного. Энергия активации максимума, рассчитанная по частотному сдвигу, имеет значение 0,2 эВ. Интервал проявления данного максимума стали 09Г2 совпадает с интервалом проявления вязкохрупкого перехода при ударных испытаниях.

Также в ходе эксперимента исследована резонансным методом температурная зависимость модуля Юнга с определением собственной частоты образца из стали 09Г2.

Температурная зависимость модуля Юнга данного образца представляет собой монотонно возрастающую при понижении температуры линейную зависимость в интервале вязкохрупкого перехода (рис.2).

Аналитические возможности метода внутреннего трения позволяют получить необходимую информацию по исследованию ранних стадий поврежденности в области вязкохрупкого перехода. В условиях микродеформации происходят локальные изменения в субмикроскопической структуре материала. Методы механической спектроскопии позволяют оценивать стадийность развития процессов деградации и накопления поврежденности деформированных малоуглеродистых сталей [5,6]. Известен ряд дислокационных механизмов, вызывающих низкотемпературные неупругие рассеяния энергии в различных металлах и сплавах с ОЦК-ре-

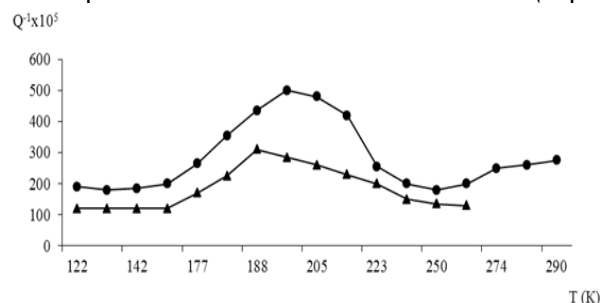


Рис.1. Температурная зависимость внутреннего трения стали 09Г2: ● – закалка; ▲ – отжиг

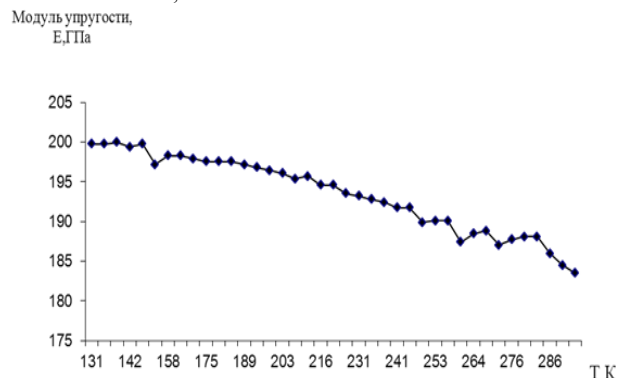


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости E стали 09Г2

шеткой. Это может быть образование термических или геометрических перегибов при движении дислокаций, взаимодействие дислокаций с точечными дефектами, изменение плотности подвижных дислокаций [7].

Максимум, расположенный в области вязкохрупкого перехода, может быть обусловлен торможением дислокаций в условиях высокой плотности перегибов на краевых дислокациях, соответственно, увеличивается уровень внутренних напряжений.

Монотонная температурная зависимость модуля Юнга в области вязкохрупкого перехода свидетельствует о том, что данный процесс никак не связан с межатомным взаимодействием [8,9]. Величина энергии активации 0,2 эВ говорит в пользу дислокационного и фононного механизма, когда в качестве очагов разрушения выступают дефекты в виде микропор и микротрещин [10]. Выбор структурного уровня происходит согласно классическому принципу стационарности действия или наименьшего действия Гамильтона [11]. При этом разрыв межатомных связей происходит по атермическому термофлуктуационному механизму при неупругом рассеянии фононов и под действием растягивающих напряжений, который может быть соответствующим образом численно смоделирован [12,13]. Следует отметить, что исследования внутреннего трения нано- и микрокристаллических сталей и сплавов [14] делают возможным теоретическое и численное моделирование накопления повреждений и разрушения таких материалов в условиях низких температур.

Заключение

Таким образом, исследование температурной зависимости внутреннего трения и модуля Юнга стали 09Г2 показало, что природа максимума связана с процессом вязкохрупкого перехода. Предположительным механизмом вязкохрупкого перехода в ОЦК-сталях является дислокационно-фононный. Хрупкое разрушение обусловлено флуктуациями на очагах в виде микропор микротрещин и дальнейшим их ростом по дислокационному механизму. Ответственными за разрыв связей становятся неупругое рассеяние фононов и внешние растягивающие напряжения.

Работа выполнена в рамках Программы 24.65 фундаментальных исследований Президиума РАН и проекта РФФИ 12-01-98515.

Литература

1. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский и др.; под ред. В.И. Трефилова; АН УССР, Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича. 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1989. – 256 с.
2. Владимирцов В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
3. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
4. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях: справ. изд. / Под ред. М.С. Блантера и Ю.В. Пигузова. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
5. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Яковенко А.А. Применение механической спектроскопии для изучения субструктурной деградации и начальных этапов разрушения сталей // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2012. – №2.
6. Чуканов А.Н. Возможности внутреннего трения в оценке состояния предразрушения материала // Известия ТулГУ. Серия Физика. – 2006. – Вып. 6. – С.202–210.
7. Кетова В.П., Печеркина Н.Л., Павлов В.А. Изучение дислокационной структуры ОЦК металлов по низкотемпературным спектрам внутреннего трения // Внутреннее трение и тонкое строение металлов и неорганических материалов / Под ред. Ф.Н.Тавадзе. – М.: Наука, 1985. – С.62–65.
8. Ларионов В.П., Семенов Я.С. Физические основы вязкохрупкого перехода низколегированных сталей и сплавов железа. – Новосибирск: Наука, 1992. – 171 с.
9. Семенов Я.С. Теория вязкохрупкого перехода сталей и сплавов железа. Обоснование механизма вязкохрупкого перехода // ДАН. – 2007. – Т. 416, № 6, – С. 780–783.
10. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
11. Веретенников В.Г., Синицын В.А. Метод переменного действия. 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 272 с.
12. Валишин А.А. Комплекс математических моделей механизма разрушения полимеров: дис. ... д.ф.-м.н. – М., 2007.
13. Юркин Ю.А. Верификация математических моделей механохимической кинетики трения и накопления повреждений в конструкционных материалах при разрушении: дис. ... к.т.н. – М.: ГОУВПО МГУС, 2007.
14. Грязнов М.Ю., Чувильдеев В.Н., Сысоев А.Н., Копылов В.И. Зернограничное внутреннее трение и сверхпластичность нано- и микрокристаллических металлов и сплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – №5(2). – С.147–158.

Поступила в редакцию 17.11.2014

УДК 532.5 (075)

Методы идентификации нестационарных математических моделей теории фильтрации

Э.А. Бондарев, А.Ф. Воеводин*

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

*Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск

Математическими моделями движения жидкостей и конвективной диффузии примесей в пористых средах являются дифференциальные уравнения эволюционного типа. Для определения их параметров по дополнительной информации о поведении искомым функций (данные измерений) предложено два метода, один из которых применим для определения постоянных параметров, а второй – для параметров, зависящих от пространственных координат. На конкретных примерах показано, что эффективность методов существенно возрастает с увеличением числа пространственных измерений, тогда как увеличение их частоты по времени ведет к повышению чувствительности – процесс восстановления приобретает колебательный характер.

Ключевые слова: математическое моделирование, методы идентификации, теория фильтрации.

Mathematical models of fluid flow and contaminations spreading in porous media are partial differential equations of evolution type. Two methods of their parameters identification have been proposed: the first one for constant parameter values, the second – for distributed ones. In terms of boundary value problems for the equation of transient fluid flow in porous media it has been shown that efficiency of the methods strongly depends on the number of measuring transducers whereas sample rate influences the methods' response.

Key words: mathematical models, identification methods, filtration theory.

Гидравлические модели, соответствующие нестационарным режимам течения, описываются дифференциальными уравнениями в частных производных эволюционного типа. Задачи идентификации параметров таких моделей начали рассматриваться сравнительно недавно в силу значительных вычислительных трудностей и отсутствия общей теории для таких задач. Используемые в настоящее время методы их решения и в идейном плане, и в техническом осуществлении сходны с методами идентификации моделей, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями [1].

Пусть общая эволюционная задача имеет вид

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f(t, x, y, y_x, y_{xx}, \lambda) \quad (1)$$

с необходимыми начальными и краевыми условиями в области $t \geq 0$, $0 \leq x \leq l$. Здесь y – вектор искомым функций, t – время, x – пространственная переменная; нижние индексы обозначают частные производные первого и второго порядка.

Требуется определить вектор неизвестных параметров $\lambda = \text{const}$ из условия минимума функционала

$$J = \int_0^T \int_0^l (y - \hat{y})' G(y - \hat{y}) dx dt. \quad (2)$$

При известном начальном приближении λ^s и соответствующем ему y^s исходную задачу (1) можно свести к последовательности линейных задач

$$Ly^{s+1} = a(t, x)\lambda^{s+1} + b(t, x), \quad (3)$$

где L – линейный дифференциальный оператор, имеющий вид

$$L = \frac{\partial}{\partial t} - f_{y_{xx}}^s \frac{\partial^2}{\partial x^2} - f_{y_x}^s \frac{\partial}{\partial x} - f_y^s,$$

а $a(t, x)$ и $b(t, x)$ – соответственно матричная и векторная функции $a = f_{\lambda}^s$, $b = f_{y_{xx}}^s y_{xx}^s - f_{y_x}^s y_x^s - f_y^s y^s - f_{\lambda}^s \lambda^s$. Аналогично линеаризуются граничные условия.

Решение (3), используя идеи метода матричной прогонки по параметру [1], представим в виде

$$y^{s+1} = X \lambda^{s+1} + z. \quad (4)$$

В результате из (3) получим для определения X и z две линейные краевые задачи:

$$LX = a(x); \quad (5)$$

$$Lz = b(x). \quad (6)$$

Решение задач (5), (6) и формула (4) позволяют в явном виде получить зависимость

БОНДАРЕВ Эдуард Антонович – д.т.н., проф., г.н.с., bondarev@ipng.ysn.ru; *ВОЕВОДИН Анатолий Федорович – д.ф.-м.н., проф., г.н.с., vovodin@hydro.nsc.ru.

$J(\lambda^{s+1})$ и в дальнейшем определить λ^{s+1} из необходимого условия стационарности по формуле

$$\lambda^{s+1} = \left[\int_0^T \int_0^l X'GX dx dt \right]^{-1} \int_0^T \int_0^l (\hat{y} - z)' GX dx dt.$$

На этом заканчивается один шаг итерационного процесса. Следующие приближения λ^{s+2} , λ^{s+3} и т.д. определяются аналогично.

Этот вариант метода идентификации будет нами использоваться при решении некоторых конкретных задач. Основное его достоинство заключается в том, что на каждом итерационном шаге решаются краевые задачи (5) и (6), отличающиеся только правой частью, при этом если исходная задача при заданных λ корректно разрешима, то и задачи (5), (6) корректно разрешимы.

Для восстановления распределенных, т.е. зависящих от пространственной переменной, параметров модели в работах [2, 3] предложен градиентный метод, который базируется на необходимых условиях оптимальности (равенство нулю первой вариации функционала). Пусть модель некоторого процесса описывается уравнением

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f(t, x, y, y_x, y_{xx}, \lambda(x), \lambda_x(x)), \quad (7)$$

где неизвестный параметр $\lambda(x)$ есть функция переменной x . Начальные и граничные условия заданы в виде:

$$y(x, 0) = y_0(x); \quad (8)$$

$$g_0(t, y, y_x) = 0 \text{ при } x = 0; \quad (9)$$

$$g_l(t, y, y_x) = 0 \text{ при } x = l. \quad (10)$$

Требуется выбрать $\lambda(x)$ таким образом, чтобы минимизировать функционал (2). Применяя стандартную технику [3], можно показать, что первая вариация функционала имеет вид

$$\begin{aligned} \delta J = \int_0^l \left\{ \int_0^T [\psi' f_{\lambda} - (\psi' f_{\lambda_x})_x + \right. \\ \left. + \psi' f_{\lambda_x} \delta(x-l) - \psi' f_{\lambda_x} \delta(x)] dt \right\} \delta \lambda dx, \end{aligned}$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака; ψ – сопряженная вектор-функция, удовлетворяющая уравнению

$$\frac{\partial \psi'}{\partial t} = -\psi' f_y + (\psi' f_{y_x})_x - (\psi' f_{y_{xx}})_{xx} \quad (11)$$

и условиям

$$\psi(x, T) = 0; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \psi' f_{y_x} - (\psi' f_{y_{xx}})_x - \psi' f_{y_{xx}} g_{0y_x}^{-1} g_{0y} = 0 \\ \text{при } x = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \psi' f_{y_x} - (\psi' f_{y_{xx}})_x - \psi' f_{y_{xx}} g_{ly_x}^{-1} g_{ly} = 0 \\ \text{при } x = l. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, для того чтобы приращение δJ было отрицательно на каждой итерации, достаточно задать приращение вектора параметров $\delta \lambda(x)$ в виде

$$\begin{aligned} \delta \lambda(x) = -W(x) \int_0^T [\psi' f_{\lambda} - (\psi' f_{\lambda_x})_x + \\ + \psi' f_{\lambda_x} \delta(x-l) - \psi' f_{\lambda_x} \delta(x)] dt, \end{aligned} \quad (15)$$

где $W(x)$ – положительно-определенная матрица весовых множителей размерности $r \times r$.

Численный алгоритм нахождения $\lambda(x)$ можно построить следующим образом:

1) выбираем начальное приближение $\lambda^0(x)$ и матрицу весовых множителей $W(x)$;

2) решаем систему (7)–(10) от $t = 0$ до $t = T$. Находим значение функционала $J(\lambda^s(x))$. Решаем систему (11)–(14) от $t = T$ до $t = 0$;

3) по формуле (15) вычисляем $\delta \lambda^s(x)$ и $\lambda^{s+1}(x) = \lambda^s(x) + \delta \lambda^s(x)$;

4) повторяем шаг 2 до выполнения условия $(J^{s+1} - J^s)/J^s \leq \varepsilon$.

Дальнейшее изложение ведется на конкретном примере модельного уравнения теории фильтрации с постоянными коэффициентами. Это уравнение соответствует линеаризованному уравнению Буссинеска для прогноза уровня грунтовых вод или уравнению упругого режима фильтрации.

В области $x \in [0, l]$, $t \in [0, T]$ рассмотрим уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, t), \quad (16)$$

в котором коэффициент $\lambda = \text{const}$ подлежит определению.

Пусть $x_1, x_2, \dots, x_n$ – характерные точки мелиорируемой территории, в которых производится измерение уровня грунтовых вод. Данные этих измерений – известные функции времени $z_j(t)$, $1 \leq j \leq n$.

Как и прежде, будем искать параметр λ из условия минимума функционала

$$J(\lambda) = \sum_{j=1}^n \int_0^T [u(x_j, \xi) - z_j(\xi)]^2 d\xi. \quad (17)$$

Кроме того, для уравнения (16) обычным образом задаем начальные и граничные условия.

Условие стационарности функционала (17) будет иметь вид

$$\frac{dJ(\lambda)}{d\lambda} = 2 \sum_{j=1}^n \int_0^T [u(x_j, \xi) - z_j(\xi)] \times w(x_j, \xi) d\xi = 0. \quad (18)$$

Здесь, как и ранее, мы ввели специальное обозначение для производной функции состояния u по параметру λ

$$w \equiv u_{\lambda}. \quad (19)$$

Разложим в ряд функцию u в окрестности λ^s с точностью до членов второго порядка

$$u_{s+l}(x, t) = u_s(x, t) + (\lambda^{s+l} - \lambda^s) w_s(x, t). \quad (20)$$

Для сокращения записи здесь и далее считается, что нижний индекс s у функции означает, что она вычисляется при значении $\lambda = \lambda^s$.

Подставляя разложение (20) в соотношение (18), линеаризуем это соотношение относительно параметра λ^{s+1} следующим образом:

$$2 \sum_{j=1}^n \int_0^T [u_s(x_j, \xi) + (\lambda^{s+l} - \lambda^s) w_s(x_j, \xi) - z_j(\xi)] w_s(x_j, \xi) d\xi = 0.$$

Отсюда легко вычислить следующее приближение λ^{s+1} , если функции $u_s(x, t)$ и $w_s(x, t)$ известны

$$\lambda^{s+l} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_0^T [\lambda^s w_s(x_j, \xi) - u_s(x_j, \xi) + z_j(\xi)] w_s(x_j, \xi) d\xi}{\sum_{j=1}^n \int_0^T w_s^2(x_j, \xi) d\xi}. \quad (21)$$

Чтобы получить уравнение для функции $w_s(x, t)$, проведем линеаризацию исходного уравнения (16) относительно решения на нижнем итерационном слое:

$$\frac{\partial u_{s+l}}{\partial t} = \lambda^s \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \delta\lambda + \lambda^s \left(\frac{\partial^2 u_{s+l}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \right) + f, \quad (22)$$

где $\delta\lambda = \lambda^{s+l} - \lambda^s$.

Подставляя в уравнение (22) разложение (20) и приравнявая коэффициенты при $\delta\lambda$ нулю, получим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} = \lambda^s \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + f; \quad (23)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \lambda^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2}. \quad (24)$$

Уравнения (23) и (24) при заданном значении λ^s могут быть решены последовательно одним из известных численных методов. Граничные и начальные условия для функции w могут быть получены из соответствующих условий для функции u путем дифференцирования их по параметру λ .

Численную реализацию изложенного метода рассмотрим на примере определения параметра λ в однородном уравнении (16)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq l$$

с начальным условием $u(x, 0) = 0$ и граничными

условиями $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ при $x = 0$, $u = 1$ при $x = l$.

Эта задача имеет аналитическое решение

$$u(x, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{2i+1} \exp \left[-\frac{\lambda(2i+1)^2 \pi^2 t}{4} \right] \times \cos \frac{(2i+1)\pi x}{2},$$

которое использовалось для вычисления «данных измерений» $z(x_j, t_k)$ при $\lambda = 0,2$. Эти величины вычислялись в пяти точках пространства $x_j = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и в дискретные моменты времени t_k , число которых варьировалось. Кроме этого варьировалась величина временного интервала T , на котором осуществлялась идентификация. Как показали вычисления, даже при задании начального приближения λ^0 в точности равного 0,2, рассмотренный алгоритм расходится. По мере увеличения количества итераций параметр λ^s колеблется возле точного значения с возрастающей амплитудой. Поэтому для решения данной задачи нами был использован модифицированный метод второго порядка. Согласно этому методу, на каждом итерационном слое вместо функционала (17) применялся функционал

$$J_N(\lambda^{s+l}) = J(\lambda^s) + N(\lambda^{s+l} - \lambda^s)^2, \quad (25)$$

где N – достаточно большая положительная постоянная.

На рис. 1 показано поведение определяемого параметра в зависимости от величины N . При этом уравнения (23) и (24) решались с помощью неявной разностной схемы. Сетка разбивала пространственный отрезок $x \in [0, 1]$ на 10 интервалов, временной отрезок $t \in [0, 0,8]$ на 100 интервалов. Точное решение вычислялось в 5×50 точках пространства–времени. Кривые 1–4 соответствуют следующим значениям множителя

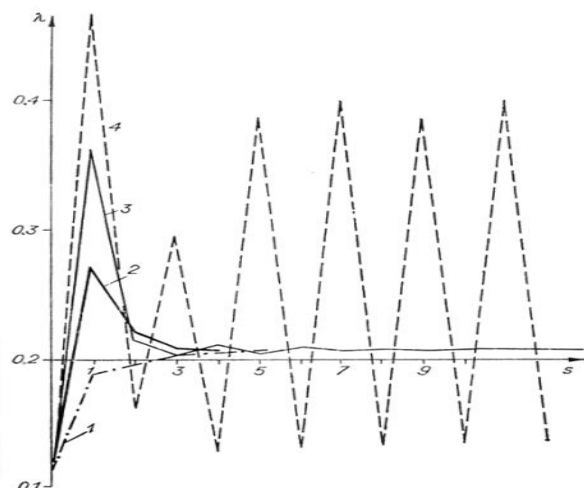


Рис. 1. Сходимость определяемого параметра: 1 – $N = 100$; 2 – $N = 40$; 3 – $N = 20$; 4 – $N = 10$

$N = 100; 40; 20; 10$. Как видно, введение модифицированного функционала (25) очень напоминает введение демфера в колебательный процесс. При достаточно больших значениях «вязкости» ($N = 100$) процесс перестает быть колебательным и параметр λ подходит к точке равновесия с одной стороны. При малых значениях N ($N = 10$) параметр λ совершает незатухающие колебания вокруг точки равновесия.

Влияние количества «измерений» на качество процесса восстановления параметра λ показано на рис. 2. В этом случае уравнения (23) и (24) решались на сетке 10×100 узлов при $N = 40$. Кривые 1–4 соответствуют случаям, когда точное решение вычисляется в 5×50 , 3×50 , 5×20 , 10×50 точках пространства–времени. Как видно, количество пространственных измерений довольно существенно отражается на качестве восстановления. Увеличение же количества замеров по времени ведет к повышению чувствительности, процесс восстановления приобретает колебательный характер.

В связи с тем, что при решении уравнений (23) и (24) используется разностная аппроксимация, полученное в результате значение искомого параметра несколько отличается от «точного» значения $\lambda = 0,2$. Таким образом, фактически имитируется случайная погрешность наблюдений. Вообще говоря, такая ситуация имеет место всегда, так как при использовании конечно-разностных методов идентифицируются не параметры исходного уравнения, а параметры его разностного аналога.

Рис. 3 демонстрирует влияние количества временных слоев разностной схемы на качество восстановления. Точное решение вычислялось в 5×20 точках пространства–времени при $N = 40$. Кривая 1 соответствует сетке из

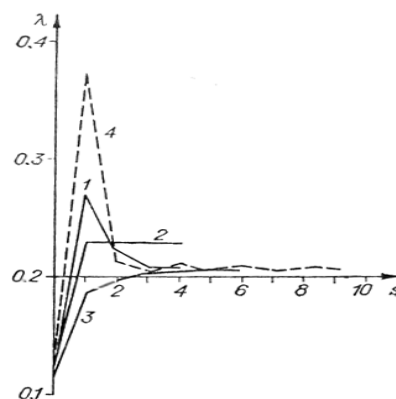


Рис. 2. Влияние количества замеров на качество сходимости итерационного процесса: 1 – 50×50 точек; 2 – 3×50 точек; 3 – 5×20 точек; 4 – 10×50 точек пространства–времени

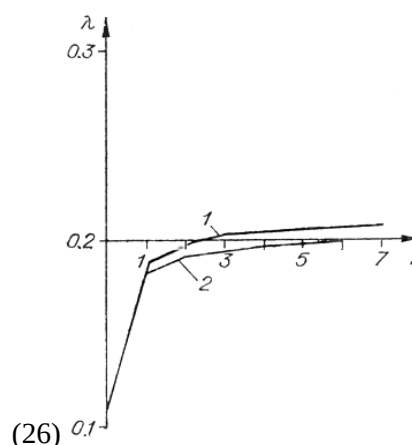


Рис. 3. Влияние количества временных слоев разностной схемы на сходимость итерационного процесса: 1 – 100 временных слоев; 2 – 40 временных слоев

10×100 узлов, кривая 2 – сетке из 10×40 узлов. Как ни странно, сетка с меньшим количеством временных слоев (кривая 2) приводит к более точному восстановлению параметра λ . Это, по-видимому, связано с накоплением погрешностей при увеличении количества вычислений. Заметим, что применение сеток из 10×120 и 10×20 узлов дает кривые восстановления, практически совпадающие с линиями 1 и 2, соответственно.

Теоретически необходимость введения модифицированного функционала (25) может быть обоснована с помощью теорем теории оптимального управления системами, описываемыми уравнениями с частными производными параболического типа, сформулированных Ж.-Л. Лионсом [4].

Уравнение (22) на верхнем итерационном слое может быть переписано в виде

$$\frac{\partial u_{s+1}}{\partial t} = \lambda^s \frac{\partial^2 u_{s+1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \delta \lambda + f, \quad (26)$$

а функционал (25) в виде

$$J_N(\delta\lambda) = \sum_{j=1}^n \int_0^T [u(x_j, \xi) - z_j(\xi)]^2 d\xi + N(\delta\lambda)^2. \quad (27)$$

Существует единственное значение $(\delta\lambda)$, удовлетворяющее условию минимума функционала (27) на $(s+1)$ -м итерационном слое только при условии $N > 0$ [4]. Если $N = 0$, то условие единственности может быть не выполнено. Для того чтобы условие единственности было выполнено и при $N = 0$, требуются измерения производных по времени от функции u . В этом случае функционал задачи должен иметь вид

$$J_N = J + \sum_{j=1}^n \int_0^T \left[\frac{du(x_j, \xi)}{dt} - z_j^I(\xi) \right]^2 d\xi, \quad (28)$$

где $z_j^I(\xi)$ – дополнительные данные наблюдений.

Однако на практике непосредственное измерение производных затруднительно, а дифференцирование данных наблюдений функции u вносит большие погрешности.

Следует отметить, что условия минимума модифицированного функционала (25) совпадают с условиями для исходного функционала (17). Интересно, что введение в исходный функцио-

нал (17) добавки вида (25) аналогично введению своеобразной функции штрафа на каждой итерации. Мы как бы «штрафуем» функционал за большое отклонение нового значения λ^{s+1} от значения λ^s на предыдущей итерации.

Как показывает опыт решения конкретных задач, привлечение дополнительной информации о решении (знание производных или более разнообразный набор измеряемых функций в случае систем уравнений) улучшает качество процесса восстановления неизвестных параметров.

Литература

1. Алифанов О.М. Определение тепловых нагрузок из решения нелинейной обратной задачи // Теплофизика высоких температур. – 1977. – Т. 15, № 3. – С. 598–605.
2. Chayent G., Dupuy M., Lemonnier P. History matching by use of optimal theory // Soc. Pet. Eng. J. – 1975. – V. 15, № 1. – P. 74–86.
3. Seinfeld J.H. Identification of parameters in partial differential equations // Chem. Eng. Sci. – 1969. – V. 24, № 1.
4. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. – М.: Мир, 1972. – 414 с.

Поступила в редакцию 23.10.2014

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Общая биология

УДК 581.9(282.256.6)(285.2)

Особенности растительного покрова о. Аграфены (Нижняя Лена)

А.П. Ефимова, Е.Н. Никифорова, Н.Г. Соломонов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

Обоснована необходимость придания статуса особо охраняемой территории о. Аграфены (Эбе-Арыта) в Жиганском районе РС(Я). Местонахождение острова на стыке географических подзон, лесорастительных округов и расчлененность его ландшафта определяют своеобразие флоры и растительности. На территории острова прослеживается широкий ряд растительных сообществ от пойменных ивняков до климаксовых лиственничных лесов. Здесь произрастает уникальный елово-лиственничный лес с не характерными для приполярной Якутии высокими показателями продуктивности. На низкой пойме острова встречаются крайние северные сообщества редкого вида ивы – *Salix triandra* L. Одной из особенностей динамики растительности исследованного острова является участие кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) на средних стадиях аллювиогенных сукцессий, что не типично для равнинных пойм крупных рек северной части Якутии. Кроме того, на острове нами впервые для Якутии обнаружен массив березового леса из особой темнокорой формы березы белой (пушистой) (*Betula alba* L. = *B. pubescens* Ehrh.). Для выяснения таксономического положения и происхождения этой формы необходимы специальные сравнительно-морфологические и молекулярно-генетические исследования.

Ключевые слова: р. Лена, о. Аграфены, *Salix triandra*, *Betula alba*, *Pinus pumila*.

*In the article the necessity to assign a special protected territory status to Agrafena (Ebe-Aryta) Island (Zhigansky ulus, the Republic of Sakha (Yakutia)) is substantiated. The location of the island on a joint of geographical, vegetation subzones and its complex partitioned landscapes determine originality of its flora and vegetation. There is a wide row of vegetable communities from inundated floodplain willows communities to the climax larch woods in the territory of the island. A unique fir-larch overmatured forest with high rates of efficiency uncharacteristic for subpolar Yakutia grows here. On the low floodplain of the island extreme northern communities of a rare species of a willow – *Salix triandra* L. occur. One of the special features of the vegetation dynamics of the island is participation of *Pinus pumila* (Pall.) Regel at average stages of alluvial successions that is antypical for flat floodplains of big rivers of northern part of Yakutia. Besides, on the island we for the first time for Yakutia found the massive of the birch forest from special dark-bark form of *Betula alba* L. = *B. pubescens* Ehrh. Special comparative morphological and molecular and genetic studies are necessary for clarification of taxonomical situation and the origin of this form.*

Key words: Lena River, Agrafena Island, *Salix triandra*, *Betula alba*, *Pinus pumila*.

Введение

Островные растительные сообщества и популяции – одни из наиболее интересных природ-

ных объектов, несущих в себе черты формирования в условиях частичной или практически полной изоляции.

В июле–августе 2013–2014 гг. нами проведены лесоводственно-геоботанические исследования растительности о. Аграфены (66°07'55"–66°12'26" с.ш.; 123°52'48"–123°44'07" в.д). На географических картах он отмечен как о. Эбе-Арыта и находится на р. Лене в районе «40 островов» в 70 км южнее Северного полярного

ЕФИМОВА Айталипа Павловича – к.б.н., с.н.с., aitalipna_ef@mail.ru; НИКИФОРОВА Евдокия Николаевна – м.н.с., gisnik@yandex.ru; СОЛОМОНОВ Никита Гаврилович – д.б.н., чл.-корр. РАН, акад. АН РС(Я), советник РАН.

круга. Цель исследований: изучение особенностей развития растительных сообществ и популяций в условиях островной изолированности.

Материалы и методы исследований

Согласно карте растительности Якутии [1], по руслу р. Лены близ о. Аграфены проходит граница растительности речных долин северотаежных лиственничных лесов в сочетании с хвощовыми, зеленомошными и сфагновыми болотами и среднетаежных лиственничных лесов с елью, березой в сочетании с вейниковыми лугами. Левобережье представлено среднетаежными кустарничково-зеленомошными лиственничными лесами. Правобережье занято северотаежными редкостойными голубичными и голубично-багульниковыми лишайниково-зеленомошными лиственничными лесами в сочетании с кустарничково-сфагновыми болотами и ерниками.

У границы Северного полярного круга простираются северотаежные редкостойные кустарничковые, лишайниковые лиственничные леса в сочетании с сосновыми лесами и зарослями кедрового стланика. Впервые остров был исследован финским геоботаником-лесоведом А.К. Каяндером в 1901 г. Он относил остров к средней бореальной зоне. Северная же бореальная зона начинается у п. Жиганск [2]. Л.А. Добрецова [3] утверждала, что все леса Жиганского района справедливее было бы отнести к северотаежному типу.

В работе использованы маршрутные исследования с применением классических флористико-геоботанических методов [4, 5]. Названия видов высших сосудистых растений приведены по «Конспекту флоры Якутии...» [6]. Возраст модельных экземпляров лиственниц определен с применением буравчика Преслера. Карта составлена на основе синтеза многозональных снимков Landsat на базе программного обеспечения ArcMap 10.1.

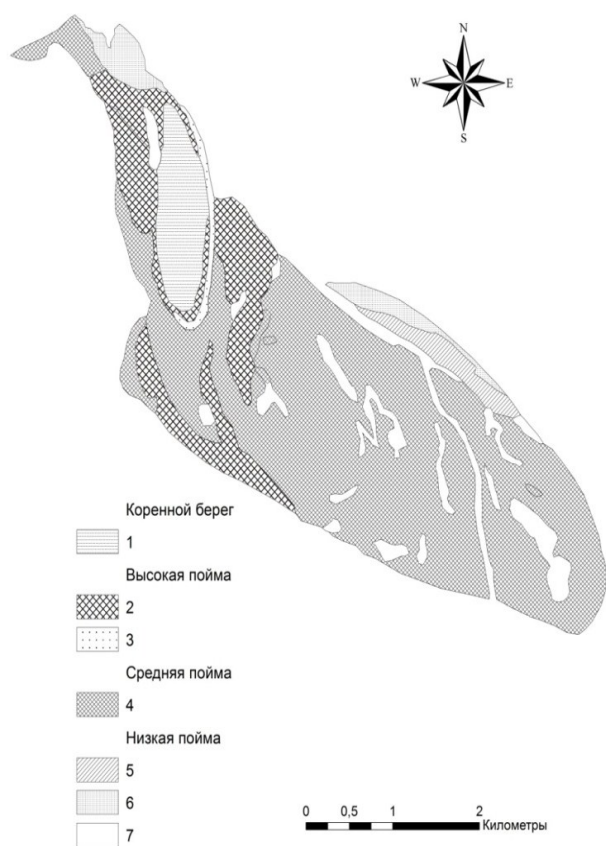
Результаты и обсуждение

Остров имеет сложное геоморфологическое строение, состоящее из ландшафтов разного генеза и возраста. Средняя часть острова представляет собой останец коренного берега, отколовшийся в свое время от материковой части и сложенный серым песчаником с выходами железистых пород. Останец покрыт кедрово-стланиковым бруснично-зеленомошным елово-лиственничным перестойным лесом из *Larix cajanderi* Mayr и *Picea obovata* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr. Наиболее высокая южная часть останца высотой около 40 м на северо-западе

переходит в понижение, пологий склон которого в настоящее время покрыт лиственничной гарью травяной стадии, возобновляющейся преимущественно кедровым стлаником. Центр ложбины занят старичным озером, окруженным заболоченными лугами. Далее к западу следует грядобразное повышение, покрытое смешанными еловыми и лиственничными лесами. Остальная часть острова представляет собой пойменный ландшафт, сформированный на илисто-песчаном аллювии р. Лены. Низкая ступень поймы занята беспокровными и полевохвощовыми аллювиофильными ивняками из *Salix viminalis* L., *S. dasyclados* Wimm., *S. udensis* Trautv. et C.A.Mey. В средней пойме произрастают средневозрастные лангсдорфевейниковые ивняки. Высокие ступени поймы заняты грушанково-зеленомошными березняками и разнотравно-зеленомошными березово-елово-лиственничными, лиственнично-еловыми лесами с *Alnus hirsuta* (Spach) Turcz.ex Rupr., *Sorbus sibirica* Hedl. и с богатым подлеском из *Alnus crispa* (Aiton) Pursh subsp. *fruticosa* (Rupr.) Banaev и *Pinus pumila* (Pall.) Regel. (рисунок).

До недавнего времени на останце произрастали девственные старовозрастные леса из лиственницы Каяндера. Посетивший остров в 1901 г. А.К. Каяндер сообщал здесь о необычно крупных для северных условий экземплярах лиственницы [6, 7]. В июле 2000 г. на острове произошёл интенсивный сплошной пожар, уничтоживший большую часть древостоев. Как свидетельствуют собранные нами натурные данные, наиболее крупномерные старовозрастные лиственницы окружностью до 3,12 м и диаметром до 1,0 м сгорели. В настоящее время сохранились лишь обгоревшие остовы пней и недогоревшие части стволов. Определить возраст этих фрагментов не представляется возможным. В целом от пожара уцелела лишь узкая 10-метровая полоса леса у обрыва, где ныне произрастают лиственницы преимущественно спелого и перестойного возраста диаметром 40–50 см. В лесу также заметны последствия ветровалов, уничтоживших пораженные сердцевинной гнилью старовозрастные деревья. Уцелевшие несколько ветровальных стволов диаметром около 70 см по предварительным подсчетам имеют максимальный возраст 250–280 лет. Как один из наиболее северных и высокопродуктивных хвойных массивов, этот лес требует глубокого изучения и охраны.

На о. Аграфены нами обнаружены крайние северные сообщества ивы трёхтычинковой (*Salix triandra* L.), занесенной в Красную книгу Якутии в III г категории как редкий вид, произрастающий на изолированном фрагменте к северу



Карта растительного покрова о.Эбе-Арыта: 1 – лиственничная гарь 2000 г.; 2 – хвойные смешанные (*Larix cajanderi*, *Picea obovata*) леса с березой (*Betula alba*) с кустарниковой растительностью (*Salix dasyclados*, *S. viminalis*) и лугами различного увлажнения; 3 – луговины на незакрепленных песчаных склонах; 4 – ивняки (*Salix dasyclados*, *S. viminalis*) с кустарниками (*Swida alba*, *Alnus crispa* subsp. *fruticosa*) и лугами различного увлажнения; 5 – ивовые молодняки (*Salix dasyclados*, *S. viminalis*, *S. triandra*) в сочетании с прибрежно-водной растительностью и лугами избыточного увлажнения; 6 – растительность песчаных отмелей; 7 – водоёмы

от основного ареала [8, 9]. *Salix triandra* – бореально-средиземноморский вид [10], распространенный в Европе и Западной Сибири. В Якутии обособленный фрагмент ареала этой ивы находится на Средней Лене под г. Якутском, где *S. triandra* на низкой пойме образует собственные моnodоминантные сообщества. Единичные особи ивы трёхтычинковой были обнаружены у устьев рр. Алдана, Вилюя, а также в низовьях р. Лены у р. Бисиктях [11]. На о. Аграфены трехтычинковоивовые фитоценозы представлены молодняками и средневозрастными насаждениями двух ассоциаций – редкотравной (*Salicetum triandrae rariherbosum*) и полевохвощовой (*S. t. equisetosum arvensis*). Сообщества заслуживают придания им статуса редких фитоценозов и принятия соответствующих мер охраны. В настоящее время есть основания считать, что *S. triandra* расширяет свой ареал в

северо-восточном направлении по долине р. Лены. Не исключается вероятность того, что наблюдается положительная реакция вида на изменение климата за последнее столетие [12–13].

На высокой пойме о. Аграфены в смешанных лесах нами обнаружена особая темнокорая форма березы белой (пушистой) (*Betula alba* L. = *B. pubescens* Ehrh.). В Якутии о подобной форме берёз ранее не сообщалось. О серококорой и темнококорой форме березы пушистой (белой) в окрестностях г. Петрозаводска в Карелии упоминает Л.В. Ветчинникова [14, 15]. У серококорой формы она отмечает пепельно-серый цвет бересты, у темнококорой – от темно-серого до темно-вишневого. Темнококорая форма березы в ботанической литературе ранее приводилась как вид *B. tortuosa* Ledeb. или подвид береза извилистая – *B. pubescens* ssp. *tortuosa* (Ledeb.) Nym., выделенные в подзоне лесотундры и горных криволиесий для европейской части СССР [16, 17]. Для Азиатской России И.Ю. Коропачинским, Т.Н. Встовской [18] отмечается высокогорная форма березы с искривленными стволами, темной корой и жесткими листьями. Обнаруженная нами форма березы белой в отличие от березы извилистой произрастает на высокой равнинной пойме в елово-березовых и елово-лиственничных, лиственнично-еловых с березой лесах. Березы одноствольные, семенного происхождения, стволы стройные высотой до 15 м. Цвет бересты от пепельно-серого до темно-серого и темно-вишневого с жемчужным блеском. У особой спелого и перестойного возрастов береста отслаивается лохматыми полосками. Таким образом, наблюдаются некоторые отличия от приведенных в литературе форм. Новая географическая форма березы белой нуждается в тщательном морфологическом, молекулярном и таксономическом изучении.

Следует отметить, что на высокой пойме о. Аграфены произрастают своеобразные елово-лиственничные, лиственнично-еловые леса с подлеском из кедрового стланика. *Pinus pumila* – горный вид, для которого наиболее типичным местопроизрастанием являются подгольцовые пояса гор. Известно, что в низовьях р. Вилюя он также встречается на песчаных тукуланах и вокруг озер на торфяных болотах с близким залеганием мерзлоты [3–19]. Последнее объясняется его способностью образовывать придаточные корни [20]. Сведения о его произрастании в равнинных поймах крупных рек с илисто-песчаным аллювием и с довольно длительными периодами застаивания полой воды в литературе отсутствуют. Как показывают исследования, на о. Аграфены кедровый стланик образует густой и высокий подлесок в сложносоставных

ольховниковых бруснично-зеленомошных лиственнично-еловых, елово-лиственничных лесах с березой в довольно узком высокопойменном поясе между низкой поймой и надпойменной террасой. Жизненность и возобновление стланика удовлетворительные, побеги до 5–6 м длиной, обилие высокое, от 15 до 50%. Несомненно, что эти сообщества представляют собой новые типы пойменных лесов на границе среднетаёжной и северотаёжной подзон и требуют специального изучения.

Заключение

Состав, структура и динамика растительного покрова о. Аграфены отличаются целым рядом особенностей. Помимо высокопродуктивных лиственничных массивов, здесь встречаются редкие сообщества *Salix triandra* и темнокорая форма *Betula alba*. Инициальные и завершающие аллювиогенные сукцессии в пойме протекают вполне типично, но средние стадии весьма специфичны – в них принимает участие кедровый стланик. Аналогичные сукцессионные линии в равнинных поймах крупных рек Якутии отсутствуют. Ель сибирская находится на этом острове близ своей северной границы и здесь её сукцессионные взаимоотношения с лиственницей тоже отличаются своеобразием. Предварительные полевые материалы свидетельствуют о том, что в настоящее время происходит усиление роли ели в динамике лесов острова, что может быть связано со смягчением климата и повышением поёмности в последние десятилетия. Необходимы дополнительные исследования для более глубокого понимания экогенетической динамики лесов на этом острове и близлежащих территориях.

Таким образом, уникальное местоположение острова на границе среднетаёжной и северотаёжной подзон близ Полярного круга, сложный ландшафт, интразональность, амфиценозность, а также редкость и своеобразие произрастающих на нем видов и растительных ценозов обуславливают целесообразность внесения о. Аграфены в список особо охраняемых территорий Якутии.

Литература

1. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. – М.: ГУГК, 1989. – 115 с.
2. Hämet-Ahti L. A.K. Cajander's vascular plant collection from the Lena River, Siberia, with his ecological and floristic notes // Ann. Bot. Fennici 7. – 1970. – P. 255–324.
3. Добрецова Л.А. Растительность Жиганского района // Научные сообщения. – Вып. 8. – Биология. – Якутск: Як. кн. изд-во, 1962. – С. 3–25.
4. Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника. – М.; Л.: Наука, 1964. – Т. III. – С. 39–62.
5. Понятовская В. М. Учёт обилия и особенности размещения видов в естественных растительных сообществах // Полевая геоботаника. – М.; Л.: Наука, 1964. – Т. III. – С. 209–299.
6. Cajander A. K. Beitrage zur Kenntniss der Vegetation der Alluvionen des nordlichen Eurasiens. 1: Die Alluvionen des unteren Lena – Tales // Acta Soc. Sci. Fennical. – Helsingfors. – B. 32. – 1903. – №1. – 182 s.
7. Cajander A. K. Studion uber die Vegetation des Urwaldes am Lena-Fluss // Acta Soc.Sci. Fenical. – Helsingfors. – B.32. – 1904. – № 3. – 40 s.
8. Красная книга Якутской АССР: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений. – Новосибирск: Наука, 1987. – 248 с.
9. Красная книга Республики Саха (Якутия). Т.1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. – Якутск: Сахаполиграфиздат, 2000. – 256 с.
10. Скворцов А.К. Ивы СССР (систематический и географический обзор). – М.: Наука, 1968. – 264 с.
11. Hämet-Ahti L. A.K. Cajander's vascular plant collection from the Lena River, Siberia, with his ecological and floristic notes // Ann. Bot. Fennici 7. – 1970. – P. 255–324.
12. Efimova A.P., Shurduk I.F. Peculiarities of distribution of the almond-leaved willow in the middle Lena floodlands depending on its phenorhythm // The role of permafrost ecosystems in global climate change: Proceeding of international conference / Ed. Boris Ivanov, Trofim Maximov. – Yakutsk, 2001. – P. 124–125.
13. Ефимова А.П. Редкие лесные сообщества поймы Средней Лены // Наука и образование. – 2010. – № 2 (58). – С. 52–55.
14. Ветчинникова Л.В. Береза: вопросы изменчивости (морфофизиологические и биологические аспекты). – М.: Наука, 2004. – 183 с.
15. Ветчинникова Л.В. Изучение формового разнообразия березы в Карелии // Практические рекомендации по исследованию экосистем в Карелии. – Петрозаводск, 2000. – С. 80–90.
16. Кузенева О.И. Род Береза // Флора СССР. – М.; Л., 1936. – Т. 5. – С. 269–277.
17. Орлова Н.И. Сем. Betulaceae С.А. Agardh // Флора Мурманской области. – М.; Л., 1956. – Вып. 3. – С. 121–124.
18. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 2002. – 707 с.
19. Пермякова А.А. Растительность незакрепленных песков (тукуланов) // Растительность бассейна реки Вилюя / Труды Ин-та биологии. – Вып. VIII. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 112–116.
20. Тихомиров Б.А. Кедровый стланик, его биология и использование. – М., 1949. – 105 с.

Поступила в редакцию 20.10.201

Влияние длительных паводков на почвенный покров бассейна р. Алазея

А.З. Иванова, Р.В. Десяткин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

В связи с изучением последствий катастрофических паводков в пределах бассейна р. Алазея в 2008–2009 гг. были впервые проведены комплексные научные исследования. Приводятся материалы по выявлению влияния длительных паводков на почвенный покров в долинной части реки, обосновывается выделение стадий нарушенности почв, подверженных длительному затоплению. На основе изменений морфологического строения нарушенных почв была проведена оценка гидроморфной трансформации почв и проанализированы основные физико-химические свойства изученных почв. В результате выполненных работ было выявлено 3 стадии нарушенности почвенных территорий: первая стадия деградации почв характеризуется нарушением водного режима почв, обусловленным сильным переувлажнением и изменением уровней протаивания, вторая – более глубоким нарушением поверхностного гумусового горизонта и частичной деструктуризацией минеральной части профиля, третья – аккумуляцией свежепривнесенного аллювия, деградацией органического горизонта и полной деструктуризацией минеральной толщи и, как следствие, полным изменением строения почвенного профиля. Таким образом было выяснено, что паводки в условиях мерзлотной области, в первую очередь, оказывают механическое воздействие на почвы, нарушая их естественное морфологическое строение, водный режим и т.д., что приводит к нарушению буферности системы, снижению плодородия и даже к заболачиванию территорий.

Ключевые слова: паводок, почвенный покров, стадии деградации, криозем.

A detailed soil research connecting with investigation of consequences of the catastrophic flood flows on the Alaseya River valley in 2008-2009 years was conducted for the first time. In this article materials on identifying of the impact of prolonged floods on a river valley soils are presented, and selection of soil degradation stages is substantiated. Hydromorphic soil transformation was evaluated on the basis of changes of the morphological structure of disturbed soils, basic physical and chemical properties of the studied soils were analyzed. As a result of the fulfilled works it was revealed three stages of soil disturbance: the first stage of soil degradation is characterized by impaired water regime caused by strong waterlogging and changing of thawing depth; the second stage is characterized by a deep disturbance of a surface humus horizon and partial destructurization of the mineral part of a profile; signs of the third stage of disturbance are the accumulation of fresh alluvium, degradation of organic horizon and full destructurization of a mineral layer and as a result a total change of the soil profile structure. Thus it was found that floods in a permafrost region, first of all, have a mechanical effect on the soil, breaking their natural morphological structure, water regime, etc., which leads to disruption of the bufferness of the system, reducing of fertility and even to waterlogging of the territories.

Key words: flood inundation, soil cover, degradation stages, cryosol.

Введение

Резкое изменение гидрологического режима р. Алазея в 2006–2009 гг. вызвало затопление не только пойменных земель, но и первой надпойменной террасы в среднем течении реки. Длительное затопление на этих территориях привело к деградации лугов и гибели лесной растительности. По оценочным данным общая

площадь погибших от подтопления лиственных лесов достигла 600 га. Продолжительный гидроморфный стресс оказал негативное влияние на почвенный покров и состояние ледового комплекса. В настоящей работе приводится оценка трансформации почв зонального ряда вследствие длительного воздействия разрушительных паводковых процессов.

Условия района исследования, объекты и методы исследования

Алазея – одна из крупнейших рек, дренирующих Приморскую низменность (площадь бассей-

ИВАНОВА Александра Зуевна – инженер 2-й кат., madalexia@mail.ru; ДЕСЯТКИН Роман Васильевич – д.б.н., зам. директора, rudes@ibpc.ysn.ru.

на 75 тыс. км²), имеет длину около полутора тысяч километров, характеризуется преимущественно атмосферным питанием. Река формируется в пределах Алазейского плоскогорья из слияния двух горных рек – Нелькан и Кадылчан [1]. Бассейн среднего и нижнего течений занимает равнинную часть Колымской низменности и имеет слаборасчлененный рельеф с абсолютными высотами менее 50 м. Строение русла сильномеандрирующее (коэффициент извилистости достигает 4).

Большая часть бассейна реки характеризуется резко выраженным континентальным климатом, за исключением островов и узкой прибрежной полосы Восточно-Сибирского моря, где континентальность проявляется немного слабее, а климат отличается менее суровой зимой и прохладным летом. По данным станции «Алазея» среднегодовая температура воздуха достигает –15,2°C, а среднегодовое количество атмосферных осадков составляет 209–276 мм. Лето в пределах верхнего и среднего течений реки короткое, сравнительно теплое, на побережье моря – прохладное, пасмурное, сырое и ветреное. По побережью океана в течение всего лета возможны снегопады. Продолжительность безморозного периода в верхнем течении реки в среднем – 70 дней. Максимальные температуры наблюдаются в июле. Несмотря на малое количество осадков, степень увлажнения большей части поверхности избыточна, что приводит к интенсивному заболачиванию территории. Основные лимитирующие факторы развития растений и почвообразования – короткий период вегетации и низкая почвенная температура [2].

В конце 20-го века гидрологический режим р. Алазея начал меняться – появились длительные летние и позднелетние паводки. Своего максимума эти паводки достигли в 2006–2009 гг. и вызвали образование огромных по площади разливов воды, которые залили не только пойменную часть, но низкие участки первой надпойменной террасы. Вся долина среднего течения реки в зиму 2007/08 г. оставалась под водой (рис. 1). Резкое изменение гидрологического режима реки во время длительных паводков привело к нарушению природной среды реки и существенной трансформации растительного и почвенного покрова долинных и приводораздельных экосистем.

Результаты научно-исследовательских работ, проведенных с

целью выяснения причин подтопления населенных пунктов, показали, что основной причиной повышения уровня р. Алазея являются принудительный и естественный спуск озер, а также изменение водного баланса реки в связи с повышением количества атмосферных осадков в 2006–2007 гг. [3]. В то же время нельзя отбрасывать фактор дополнительной подпитки всех водоемов бассейна реки за счет таяния верхних слоев льдистой многолетней мерзлоты при увеличении мощности деятельного слоя. По свидетельствам местных жителей, в районе г. Среднеколымск и с. Сватай мощность сезонного протаивания в 70-е годы прошлого столетия в лесу не превышала 0,7–0,8 м, а в настоящее время – она более 1 м. По литературным данным, за последние 20 лет отмечено увеличение величины деятельного слоя Колымской низменности на 15–30% [4, 5].

Бассейн реки включает три ботанико-географические зоны: тундровая, лесотундровая и таежная, представленная в данном случае подзоной северной тайги [6]. По почвенно-географическому районированию России бассейн нижнего течения р. Алазея относится к Восточно-Сибирской провинции очень холодных мерзлотных почв зоны тундровых глеевых почв и подбуров Субарктики полярного пояса Евразийской полярной области полярного пояса [7]. Почвенный покров бассейна среднего и верхнего течений реки входит в Индигиро-Колымскую провинцию очень холодных мерзлотных почв подзоны таежных глее-мерзлотных почв северной тайги Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области бореального пояса. По классификации почв России [8], почвы, формирующиеся на исследуемой территории, входят в



Рис.1. Наводнение на р. Алазея в 2007 г. (с. Сватай)

отдел криотурбированных (подтипы: криоземы типичные, грубогумусные, перегнойные, торфяно-криоземы) и глеевых (глееземы типичные, грубогумусные, криотурбированные) ствола постлитогенных и в отдел торфяных ствола органиогенных почв. Почвообразующие породы представлены четвертичными отложениями, главным образом, речным аллювием, мощность которых достигает нескольких десятков метров [9]. Гранулометрический состав почв – суглинистый с примесью супеси и песка в районе среднего течения р. Алазея, сменяющийся постепенно при продвижении вниз по течению суглинистым с примесью вязких супесчано-илистых отложений [10].

Все почвы района исследования в какой-то степени прошли или проходят гидроморфную стадию развития. В подзоне северной тайги (район исследования в окрестностях с. Сватай и с. Аргахта), на надпойменных террасах и водоразделе, на древних аллювиальных отложениях формируются криоземы типичные (гомогенные, надмерзлотно-глееватые) и криоземы тиксотропные. Морфологическими признаками криоземов являются: отсутствие заметной дифференциации профиля, формирование в условиях высокого гидроморфизма, слабые признаки оглеения в нижних горизонтах, тиксотропия и гомогенизация профиля [8,10]. На низкой пойме были описаны аллювиальные слаборазвитые почвы.

В окрестностях п. Андрюшкино начинается подзона лесотундр, переходящая в зону тундр. В этом районе уменьшается уровень протаивания почв, увеличиваются степень и признаки оглеения. Здесь развиваются тундровые глееватые и торфянисто-глееватые почвы, приуроченные к сравнительно хорошо дренируемым участкам арктической и субарктической тундры, на которых хорошо выражен пятнисто-бугорковатый микрорельеф [10]. Пойменные почвы в зоне тундр представлены аллювиальными дерново-глееватыми.

Объектами данного исследования стали наиболее распространенные почвы зонального ряда – криоземы типичные. Полевые работы по оценке современного состояния почв района исследования и степени их деградации были выполнены в сентябре 2008–2009 гг. в период максимального оттаивания мерзлотной почвы. В статье приводится морфологическое описание 3 нарушенных почвенных профилей. Для индексации горизонтов и названия почв использовались общепринятые почвенные методики и работы [11,12]. Также для сравнительного анализа фоновой и нарушенных почв был выполнен ряд физико-химических определений: водо-

родный показатель pH (ГОСТ 26423–85), содержание гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213–91), содержание обменных Ca и Mg (ГОСТ 26487–85), содержание обменного водорода и гидролитическая кислотность (ГОСТ 26212–91), содержание подвижных форм железа по Мера-Джексону и Тамму.

Для оценки степени гидроморфизма почв, подвергшихся влиянию паводковых вод, использовался коэффициент Швертманна [13], который представляет собой относительную долю аморфного железа от железа несиликатных соединений ($K_s = Fe_a / Fe_{nc}$). Также был рассчитан критерий Бодегома [14], считающийся индикатором содержания двухвалентного железа, образовавшегося в результате биологических процессов (критерий Бодегома = $0,19 \cdot Fe_a - 0,028 \cdot (Fe_{nc} - Fe_a)$).

Результаты и обсуждение

Влияние огромной водной массы, аккумулировавшей положительные температуры, заключается в резкой активизации процессов, связанных с приставкой термо- (термоэрозия, термоденудация, термоабразия, термокарст и т.д.). Интенсификация эрозионных процессов, вызванных этими процессами, на территории, содержащей ледовый комплекс, сопровождается повсеместным образованием просадок рельефа, размыва и обрушения берегов. При этом поступление дополнительной массы глинистых пород в воды реки многократно увеличивает содержание взвешенных частиц и на равнинных местах при слабом течении приводит к постепенному накоплению материала в нижнем течении реки и формирует некую природную преграду водным массам, увеличивая тем самым время затопления [15]. При медленном спаде разлившейся по всей долине реки воды идет аккумуляция взвешенных частиц на поверхности затопленных почв.

Как показали наши исследования в 2008 г., поверхность всей пойменной части долины реки была сильно трансформирована русловыми процессами (рис. 2). Русловые потоки, с одной стороны, интенсивно смыли поверхностные горизонты почв выступающих частей микро- и мезоповышений. С другой стороны, на почвах понижений рельефа шла аккумуляция свежего аллювия. Мощность слоя свежих аллювиальных отложений достигает 10 см и более. Соотношение площади смытых и покрытых свежим аллювием почв составляет 2/3. Трансформацию морфологического строения почв можно расценить как нарушение генетических признаков, вызывающих смену доминирующих почвообра-



Рис. 2. Деградация растительно-почвенного покрова

зовательных процессов и приводящих к изменениям типовой принадлежности тех или иных почв вне поймы, т.е. на I надпойменной террасе. В условиях поймы это обычный процесс формирования аллювиальных почв.

Длительное затопление, как и везде при таких случаях, приводит к установлению по всему профилю почв условий анаэробнобиоза, тем самым способствует развитию процессов без доступа свободного кислорода, что нарушает окислительно-восстановительную обстановку, ведет к появлению закисных форм полуторных окислов и, в конечном счете, снижает уровень плодородия почв и ухудшает питание растений. По этой причине пастбища и сенокосные угодья, попавшие под влияние длительных паводков, находятся в угнетенном состоянии.

В районе верхнего течения реки влияние паводка на почвы незначительно. В профиле, испытывавшем затопление почв, лишь выражены признаки процессов оглеения, интенсивно про-

текающих в анаэробной обстановке в условиях избыточного увлажнения. Наиболее разрушительное действие паводка на почвы наблюдается в районе среднего и нижнего течений р. Алазея (окрестности с. Аргахта и п. Андрюшкино). Здесь было выделено 3 стадии деградации зонального типа почв – криозема (рис. 3):

а – слабая степень: профиль почвы характеризуется повышенной переувлажненностью, тиксотропией и частичной гомогенизацией. Почва очень вязкая, с нарушенной почвенной структурой. Верхний органический горизонт частично перемешан с минеральными илистыми частицами;

б – средняя степень: верхняя органическая часть профиля частично деградирована. Грунт очень мокрый, бесструктурный. На поверхности почвы незначительный фрагментарный слой аллювиальных отложений.

в – сильная степень: на поверхности почвы слой иловато-суглинистого речного аллювия (около 6–10 см). Органический горизонт нарушен, частично смыт. Минеральная толща переувлажнена и лишена структуры. Поверхностный слой отложений имеет голубовато-сизую окраску, что говорит об интенсивном процессе восстановления железа в анаэробных условиях.

Приводим описания почв, трансформированных под влиянием длительных паводков почв.

Разрез Р-15 (слабая степень деградации) был заложен в местечке Кумах на надпойменной террасе (2,5 м над урезом воды) под злаково-зеленомошным ивняком, сформировавшемся на месте лиственничного леса. Микрорельеф неровный, мерзлота вскрывается на глубине 81 см. Почва представлена криоземом типичным.



а



б



в

Рис. 3. Деградация криоземов в зоне северной тайги

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПАВОДКОВ НА ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ БАССЕЙНА Р. АЛАЗЕЯ

О (АО)	0–7	Моховый оес, в нижней части состоит из слаборазложённых растительных остатков
ABg	7–22	Мокрый, серовато-бурый оглеенный, суглинистый, уплотнен, много корней и растительных остатков, слабооструктуренный, комковатый, переход заметный по окраске, граница неровная
Bg(G)	17–62 └81	Мокрый, неоднородный, на светло-сизом сером фоне много охристых и светлых пятен, суглинистый, местами супесчаный, неоструктуренный, вязкий, зерна кварца, корней мало

Профиль почвы характеризуется повышенной переувлажненностью, вязкостью, частичной гомогенизацией и нарушением почвенной структуры. Верхний органогенный горизонт частично перемешан с минеральными илистыми частицами.

Разрез Р–17 (средняя степень деградации) был заложен в 8 км вниз по течению от местечка Кумах на затопляемом фрагменте террасы под голубично-моховым ивняком, сформированном на месте лиственничного редколесья. Микрорельеф очень неровный, мерзлота вскрывается на глубине 87 см, присутствует верховодка (40 см). Бывший криозем типичный или тиксотропный.

АО (RJ)	0–2(12)	Мокрый, сильно перемешан с минеральной частью (супесь), фрагментарный, нарушен, много неразложённых растительных остатков, переход постепенный, граница неровная
Bg	2(12)– 40 └87	Мокрый, сочится водой, светло-серовато-бурый с ржавыми пятнами, суглинистый, бесструктурный, вязкий, плотный, корней почти нет, зерна кварца

Разрез Р–22 (сильная степень деградации) был заложен в окрестностях п. Аргахта (левый берег) на затопляемой надпойменной террасе, припущенной к берегу, под бывшим бруснично-голубично-багульниково-ерниково-зеленомош-

ным лиственничным лесом. Микрорельеф очень неровный, мерзлота – 75 см, присутствует верховодка (35 см). Бывший криозем типичный.

RJr	8–0	Мокрый, свежееотложенный аллювий, однородный, серовато-сизый с голубоватым оттенком, тяжелосуглинистый, бесструктурен, уплотнен, легко отрывается от нижележащего горизонта, темные пятна органики и ржавые пятна единичные до 0,5 см, корней нет, переход резкий, граница слабоволнистая
АО' (RJ)	0–13	Состоит из растительных остатков неразложённых и слабой степени разложённости, деградирован, часть материала привнесена, частично смытый, перемешан с илистым аллювием и нижележащим горизонтом, переход заметный, граница неровная
Bg'	13–35 └75	Мокрый, неоднородный, на светло-сизовато-буром фоне ржавые пятна (15%), среднесуглинистый, плотный, корней мало

Верхняя органогенная часть профиля практически полностью отсутствует. Грунт очень мокрый, бесструктурный. На поверхности почвы небольшой фрагментарный слой аллювиальных отложений. На поверхности почвы слой иловато-суглинистого речного аллювия (до 10 см). Органогенный горизонт нарушен, частично смыт. Минеральная толща переувлажнена и лишена структуры. Поверхностный слой отложений имеет голубовато-сизую окраску, что говорит об интенсивном процессе восстановления железа в анаэробных условиях.

Сравним основные морфологические и физико-химические характеристики данных почв со свойствами почвы разреза Р–12, представленной ненарушенным криоземом типичным, обозначенным как фон (таблица). В засушливые годы стало заметно, что первая степень нарушенности почвенного профиля имеет хорошую тенденцию к восстановлению. Морфологически уже наблюдаются улучшение гидрологических свойств почвы, проявление структуры, изменение цвета и вязкости и резкое уменьшение

Основные физико-химические свойства нарушенных и ненарушенных почв

Стадия нарушения, разрез	Горизонт	Мощность, см	pH _{водн}	Гумус*, %	Обменные катионы, ммоль/100г			ГК, ммоль / 100г	Степень насыщенности, %	Fe, %		Коеф. Швертманна	Критерий Бодгома
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺			по Тамму	по Мера-Джексона		
Фон	АО	0–16	4,0	46,52*	19,6	11,8	45,7	151,0	17,2	–	–	–	–
Р–12	Bg	16–47	5,5	0,75	3,1	1,5	0,8	4,7	49,8	0,31	0,43	0,71	0,05
I	ABg	7–22	4,9	1,90	7,2	4,8	11,7	35,6	25,1	0,79	1,11	0,71	0,14
Р–15	Bg(G)	22–81	5,9	1,88	5,0	3,6	2,0	3,6	70,5	0,35	0,46	0,76	0,06
II	АО(RJ)	0–2(12)	5,2	24,35*	12,9	8,6	8,6	46,8	31,4	–	–	–	–
Р–17	Bg	2(12)–87	5,0	3,87	5,4	3,1	4,5	16,0	34,6	0,61	0,79	0,78	0,11
III	RJr	0–8	5,7	1,81	3,9	2,9	0,2	5,6	54,9	0,48	0,62	0,77	0,09
	АО'(RJ)	8–21	5,2	32,25*	23,9	10,9	8,9	68,9	33,5	–	–	–	–
	Bg'	21–75	5,1	4,89	4,9	4,2	2,5	15,9	36,5	0,64	0,76	0,84	0,12

* Потеря при прокаливании почвы (ППП).

уровня протаивания почвы. Но вторая и третья стадии всё также характеризуются общей переувлажненностью грунта, что способствует увеличению глубины протаивания от 40 до 90 см. И если в последующие годы климат будет холоднее, то избыточная влажность может привести к последующему уменьшению мощности деятельного слоя и заболачиванию [16]. В таких почвах наблюдается тенденция к уменьшению кислотности в верхней части профиля за счет привнесенного аллювия и деградации органического горизонта. Гумус в северных почвах фульватный, т.е. очень подвижный, поэтому под воздействием паводковых вод и процессов гомогенизации в нижележащих минеральных горизонтах увеличивается содержание органического вещества почвы (от 0,75 до 4,85%). Гидролитическая кислотность уменьшается, что может быть связано с частичной деградацией верхнего органического горизонта. Все почвы слабо насыщены основаниями. В данном случае можно отметить, что максимумы распределения по значению степени насыщенности постепенно переместились в верхнюю часть профиля. При движении с юга на север, вниз по течению р. Алазея, степень нарушенности профиля увеличивается.

Для выявления динамики почвообразовательных процессов в условиях длительных паводков в исследуемых почвах определены несиликатные (вытяжка по Мера-Джексону) и аморфные формы железа (вытяжка по Тамму). Коэффициент Швертманна дает представление о степени старения и кристаллизации свободных оксидов и гидроксидов железа, что помогает диагностировать процессы, происходящие в почвах. В России коэффициент Швертманна используют для оценки степени гидроморфизма почв и считается, что он возрастает по мере увеличения степени гидроморфизма почв [17, 18]. Хотя для коэффициента Швертманна не существует общепринятой шкалы, многие авторы, в том числе и сам Швертманн, считают этот показатель довольно грубым для оценки гидроморфизма [15], тем не менее, в нашем случае данный коэффициент хорошо согласуется со стадиями нарушенности почв. В исследуемых почвах коэффициент хоть и незначительно, но постепенно увеличивается по мере нарушенности почв – в минеральной толще фоновой почвы K_s равен 0,71, тогда как в почве третьей стадии нарушенности достигает 0,84. Это свидетельствует о том, что при сильном увлажнении зональной почвы из окристаллизованных форм возможно образуются дополнительные аморфные закисные формы, которые при осушении потом могут вновь кристаллизоваться [19].

Заметно, что содержание железа немного коррелирует с реакцией среды и содержанием гумуса: в образце с наиболее кислой средой и средним содержанием гумуса (P-15, ABg) наблюдается максимальное накопление железа, а вот в почве с наименьшим содержанием гумуса и средним показателем реакции среды (фон P-12, Bg) отмечается наиболее низкая аккумуляция подвижного железа. Таким данным соответствует распределение значений критерия Бодегома – высокие показатели отмечаются в образцах с высоким показателем гумуса и наиболее низкой реакцией среды, что вполне объяснимо, если учитывать биологическую природу данного критерия.

В целом, несмотря на небольшое повышение значений коэффициента Швертманна, данный показатель указывает на среднюю степень гидроморфизма с потенциалом возрастания при условии, что в последующие годы почвы третьей стадии нарушенности будут заболачиваться.

Известно, что вследствие динамичности экологических связей разрыв или деструкция отдельных связей приведет к нарушению равновесия в системе. Из-за изменения таких физических показателей состояния мерзлотной почвы, как влажность, структурированность, плотность, глубина протаивания, меняется продуктивность растительных масс. Почва быстро достигает полной влагоемкости из-за природного водоупора – мерзлоты. На больших пологих территориях с многочисленными понижениями, имеющих минимальный внутрипочвенный боковой сток, отгон влаги происходит лишь за счет испарения и занимает много времени. Почва долго остается переувлажненной, что впоследствии приводит к ограниченному поступлению кислорода в почву, отмиранию корней растений, нарушению структуры, поднятию уровня протаивания в последующие годы и заболачиванию. В затапливаемых почвах в условиях кислородного голодания и избыточного увлажнения устанавливается неблагоприятная окислительно-восстановительная обстановка, значительно снижающая уровень плодородия почв.

Заключение

Паводки в условиях мерзлотной области, где компоненты природной среды характеризуются слабой устойчивостью, в первую очередь, оказывают механическое воздействие на почвы, нарушая их естественное морфологическое строение. Длительное затопление вызывает деградацию поверхностного органического горизонта, резкое ухудшение структуры, изменение теплофизических свойств почвы. Это приводит

к уменьшению продуцирования биомассы, снижению биологической активности, трансформации процессов разложения и нарушению буферности системы. Вторая и третья стадии нарушенности почв наблюдаются на участках, где была зафиксирована полная или частичная гибель первоначального растительного сообщества (лиственничника), поэтому в настоящее время на этих территориях отмечается смена типа растительности и водного режима, что в свою очередь обязательно станет причиной изменения характера типобразующих почвенных процессов.

Литература

1. *Реки и озера Якутии*. Краткий справочник / Отв. ред. В.И. Агеев. – Якутск: Бичик, 2007. – 136 с.
2. *Андреев В.Н.* Сезонная и погодная динамика, фитомассы в субарктической тундре. – Новосибирск: Наука, 1978. – 189 с.
3. *Готовцев С.П., Находкин Н.А., Барышев Е.В., Копырина Л.И.* О причинах подтопления населенных пунктов в бассейне р. Алазеи // Наука и техника в Якутии. – Якутск, 2008. – № 2 (15). – С. 23–26.
4. *Davydov S.P., Fyodorov-Davydov D.G., Neff J.C. et al.* Changes in Active Layer Thickness and Seasonal Fluxes of Dissolved Organic Carbon as a Possible Baseline for Permafrost Monitoring. Ninth International Conference on Permafrost. Vol.1. Institute of Northern Engineering. University of Alaska Fairbanks. USA. – 2008. – P. 333–336.
5. *Fyodorov-Davydov D.G., Kholodov A.L., Ostroutov V.E. et al.* 2008. Seasonal Thaw of Soils in the North Yakutian Ecosystems. Ninth International Conference on Permafrost. Volume 1. Institute of Northern Engineering. University of Alaska Fairbanks. USA. – 2008. – P. 481–486.
6. *Сивцева А.И., Мостахов С.Е., Дмитриева З.М.* География Якутской АССР. – Якутск: Кн. изд-во, 1984. – 168 с.
7. *Национальный атлас почв Российской Федерации*. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.
8. *Классификация и диагностика почв России*. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
9. *Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В., Шепелёв В.В.* Об изменении геоэкологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2009. – С. 5–11.
10. *Иванова А.З., Десяткин Р.В.* Криоземы бассейна р. Алазея // Наука и образование. – 2011. – №2(62). – С.70–73.
11. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. – Новосибирск: Наука, 1979. – С.73–109.
12. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – 172 с.
13. *Schwertmann U.* Some properties of soil and synthetic iron oxides // Iron in Soil and Clay Minerals. – Dordrecht: Reidel, 1988. – P. 203–250.
14. *Bodegom P.M., Reeve J., Gon H.A.C.D.* Prediction reducible soil iron content from iron extraction data // Biogeochemistry. – 2003. – V.64. – P.231–245.
15. *Водяницкий Ю.Н.* Диагностика переувлажненных минеральных почв. – М.: ГНУ «Почвенный институт им. В.В.Докучаева РАСХН», 2008. – 80с.
16. *Десяткин Р.В., Оконешикова М.В., Десяткин А.Р.* Почвы Якутии. – Якутск, 2009. – 61 с.
17. *Аветов Н.А., Сопова Е.О., Головлева Ю.А. и др.* Диагностика гидроморфизма в почвах автономных позиций Северо-Сосьвинской возвышенности (Западная Сибирь) // Почвоведение. – 2014. – №11. – С. 1283–1292.
18. *Зайдельман Ф.Р.* Эколого-мелиоративное почвоведение гумидных ландшафтов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 320 с.
19. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация заболоченных почв Нечерноземной зоны РСФСР: справочная книга. – М.: Колос, 1981. – 186 с.

Поступила в редакцию 06.02.2015

УДК 574.52

Зависимость состава диатомовых комплексов водоемов мегаполиса от параметров водной среды (на примере г. Санкт-Петербурга)

А.В. Лудикова

Институт озераедения РАН, г. Санкт-Петербург

Приведены результаты изучения особенностей состава диатомовых комплексов поверхностного слоя донных отложений г. Санкт-Петербурга в зависимости от заданных параметров водной среды (глубины, содержания общего фосфора, pH и удельной электропроводности). Применение многомер-

к уменьшению продуцирования биомассы, снижению биологической активности, трансформации процессов разложения и нарушению буферности системы. Вторая и третья стадии нарушенности почв наблюдаются на участках, где была зафиксирована полная или частичная гибель первоначального растительного сообщества (лиственничника), поэтому в настоящее время на этих территориях отмечается смена типа растительности и водного режима, что в свою очередь обязательно станет причиной изменения характера типобразующих почвенных процессов.

Литература

1. *Реки и озера Якутии*. Краткий справочник / Отв. ред. В.И. Агеев. – Якутск: Бичик, 2007. – 136 с.
2. *Андреев В.Н.* Сезонная и погодная динамика, фитомассы в субарктической тундре. – Новосибирск: Наука, 1978. – 189 с.
3. *Готовцев С.П., Находкин Н.А., Барышев Е.В., Копырина Л.И.* О причинах подтопления населенных пунктов в бассейне р. Алазеи // Наука и техника в Якутии. – Якутск, 2008. – № 2 (15). – С. 23–26.
4. *Davydov S.P., Fyodorov-Davydov D.G., Neff J.C. et al.* Changes in Active Layer Thickness and Seasonal Fluxes of Dissolved Organic Carbon as a Possible Baseline for Permafrost Monitoring. Ninth International Conference on Permafrost. Vol.1. Institute of Northern Engineering. University of Alaska Fairbanks. USA. – 2008. – P. 333–336.
5. *Fyodorov-Davydov D.G., Kholodov A.L., Ostroutov V.E. et al.* 2008. Seasonal Thaw of Soils in the North Yakutian Ecosystems. Ninth International Conference on Permafrost. Volume 1. Institute of Northern Engineering. University of Alaska Fairbanks. USA. – 2008. – P. 481–486.
6. *Сивцева А.И., Мостахов С.Е., Дмитриева З.М.* География Якутской АССР. – Якутск: Кн. изд-во, 1984. – 168 с.
7. *Национальный атлас почв Российской Федерации*. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.
8. *Классификация и диагностика почв России*. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
9. *Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В., Шепелёв В.В.* Об изменении геоэкологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2009. – С. 5–11.
10. *Иванова А.З., Десяткин Р.В.* Криоземы бассейна р. Алазея // Наука и образование. – 2011. – №2(62). – С.70–73.
11. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. – Новосибирск: Наука, 1979. – С.73–109.
12. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – 172 с.
13. *Schwertmann U.* Some properties of soil and synthetic iron oxides // Iron in Soil and Clay Minerals. – Dordrecht: Reidel, 1988. – P. 203–250.
14. *Bodegom P.M., Reeve J., Gon H.A.C.D.* Prediction reducible soil iron content from iron extraction data // Biogeochemistry. – 2003. – V.64. – P.231–245.
15. *Водяницкий Ю.Н.* Диагностика переувлажненных минеральных почв. – М.: ГНУ «Почвенный институт им. В.В.Докучаева РАСХН», 2008. – 80с.
16. *Десяткин Р.В., Оконешикова М.В., Десяткин А.Р.* Почвы Якутии. – Якутск, 2009. – 61 с.
17. *Аветов Н.А., Сопова Е.О., Головлева Ю.А. и др.* Диагностика гидроморфизма в почвах автономных позиций Северо-Сосьвинской возвышенности (Западная Сибирь) // Почвоведение. – 2014. – №11. – С. 1283–1292.
18. *Зайдельман Ф.Р.* Эколого-мелиоративное почвоведение гумидных ландшафтов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 320 с.
19. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация заболоченных почв Нечерноземной зоны РСФСР: справочная книга. – М.: Колос, 1981. – 186 с.

Поступила в редакцию 06.02.2015

УДК 574.52

Зависимость состава диатомовых комплексов водоемов мегаполиса от параметров водной среды (на примере г. Санкт-Петербурга)

А.В. Лудикова

Институт озераедения РАН, г. Санкт-Петербург

Приведены результаты изучения особенностей состава диатомовых комплексов поверхностного слоя донных отложений г. Санкт-Петербурга в зависимости от заданных параметров водной среды (глубины, содержания общего фосфора, pH и удельной электропроводности). Применение многомер-

ЛУДИКОВА Анна Валерьевна – к.г.н., н.с., ellerbeckia@yandex.ru.

ной статистики (канонического анализа соответствий) позволило выявить закономерности распределения видов диатомей в городских водоемах. Установлены количественно выраженные экологические предпочтения основных таксонов.

Ключевые слова: диатомовые комплексы, городские водоемы, гидрохимия, канонический анализ соответствий.

The paper discusses the results of the study of surface-sediment diatom species – environment relationships in the water bodies of St. Petersburg city. Application of canonical correspondence analysis (CCA) enabled establishing a relationship between the diatom assemblages composition and water depth, total phosphorus, pH and specific conductivity. Ecological preferences of main diatom species have been established as well.

Key words: surface-sediment diatoms, urban ponds, hydrochemistry, canonical correspondence analysis, St. Petersburg.

Введение

Диатомеи (*Bacillariophyta*) являются одной из наиболее важных индикаторных групп водорослей и широко используются для оценки качества водной среды, в связи с чем главной задачей представляется уточнение их экологических предпочтений в водных объектах, характеризующихся различной степенью антропогенного воздействия. Для водоемов урбанизированных территорий, как правило, присуще нарушение естественных процессов функционирования экосистем и формирования качества вод вследствие интенсивной антропогенной нагрузки и низкой способности к самоочищению [1].

Хорошая сохранность кремниевых створок диатомей в донных осадках дает возможность изучать диатомовые комплексы из поверхностного слоя донных отложений, которые, в отличие от живых водорослевых сообществ, представляют интегрированную пространственно-временную характеристику состояния водной экосистемы. В свою очередь использование методов многомерной статистики позволяет выявлять факторы среды, определяющие состав диатомового населения водоемов, и устанавливать количественно выраженные экологические предпочтения отдельных видов [2].

Целью настоящей работы стало установление зависимости состава современных диатомовых комплексов водоемов г. Санкт-Петербурга и распространения отдельных видов диатомей от различных параметров водной среды.

Материалы и методы

Исследован состав диатомовых комплексов из поверхностного слоя донных отложений 54 водоемов, рас-

положенных на территории г. Санкт-Петербурга (рис. 1), 3 из которых имеют естественное происхождение, тогда как остальные представляют собой искусственные образования (пруды, карьеры, пруды-водохранилища на малых реках). Основными источниками загрязнения водоемов г. Санкт-Петербурга являются автомагистрали и железные дороги, хозяйственно-бытовые стоки, поверхностный сток и дренажные воды, несанкционированные свалки в береговой зоне, рекреационное использование и т.д. [3]. Пробы отбирались в предполагаемой точке максимальной глубины, где происходит интегральная седи-

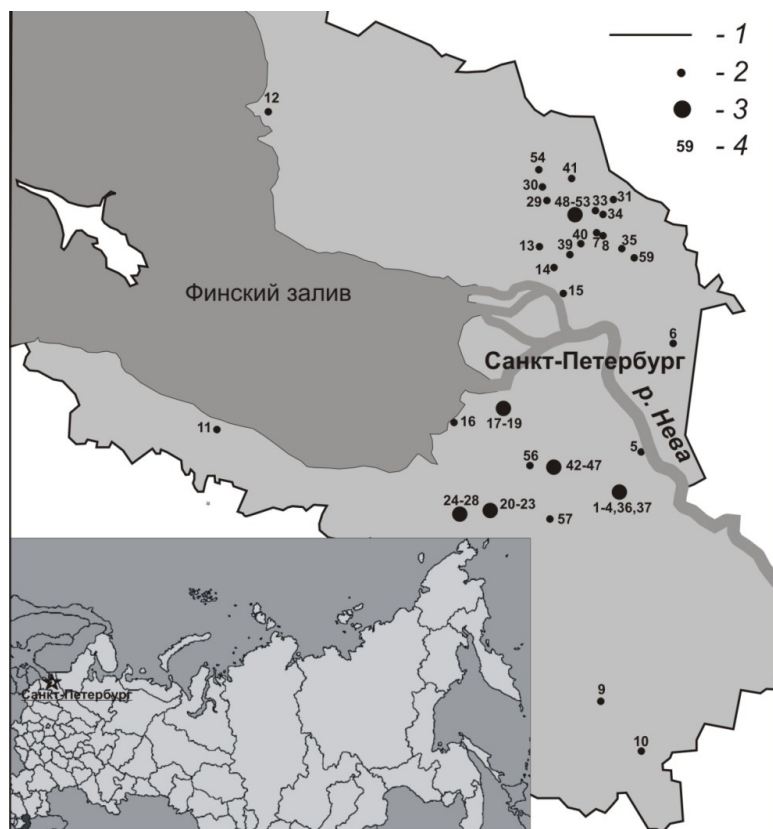


Рис. 1. Местоположение объектов исследования: 1 – граница г. Санкт-Петербурга; 2 – отдельные водные объекты; 3 – группы объектов; 4 – номера объектов

ментация тонкого материала. Подготовка проб выполнялась по стандартной методике [4] за исключением обработки тяжелой жидкостью. Идентификация диатомей проводилась с применением определителей [5].

Для выявления зависимости состава диатомовых комплексов от параметров водной среды (максимальная глубина, $H_{\max}$; среднегодовые значения содержания общего фосфора; $P_{\text{общ}}$, удельной электропроводности, УЭП и активной реакции среды, pH) был использован канонический анализ соответствий (canonical correspondence analysis, CCA). Канонический анализ соответствий относится к методам прямой ординации – ординации с участием известных параметров среды. С учетом данных об относительной численности видов и значений параметров среды он позволяет синтезировать из комбинаций последних искусственные градиенты (канонические оси), вдоль которых происходит максимальное разделение видов по экологическим нишам [6]. Статистическая обработка данных производилась в программе CANOCO 4.5 [7].

Результаты и обсуждение

В поверхностном слое донных отложений 54 водоемов г. Санкт-Петербурга было обнаружено 350 видов и внутривидовых таксонов диатомей. Основные виды показаны на диаграмме (рис. 2). В математическую обработку



Рис. 2. Параметры водной среды и основные виды диатомей в диатомовых комплексах водоемов г. Санкт-Петербурга (по группам – см. объяснение в тексте)

были включены 133 таксона, отмеченные как минимум в 3 водоемах и достигающие относительной численности 1%, хотя бы в одном из них (рис. 3). Использование метода перестановок Монте-Карло показало, что все 4 параметра среды, включенные в ординацию, являются статистически значимыми ($p < 0,01$). В сумме на две первые оси канонического анализа соответствий приходится 13,3% совокупной изменчивости состава диатомовых комплексов. Корреляция между составом диатомовых комплексов и параметрами среды для осей 1 и 2 довольно высока (0,864 для оси 1 и 0,841 для оси 2), и вместе они «объясняют» 69,7% изменчивости состава диатомовых комплексов в зависимости от указанных параметров среды. Каноническая ось 1 ($\lambda = 0,219$) обнаруживает тесную связь с $P_{\text{общ}}$ и УЭП, тогда как каноническая ось 2 ($\lambda = 0,171$) коррелирует с глубиной и pH.

Поскольку значения активной реакции среды для исследованных водоемов изменяются в незначительных пределах, определяющим фактором ранжирования объектов вдоль оси 2, очевидно, является глубина. Таким образом, канонические оси 1 и 2 позволили в первом приближении разделить наиболее высокотрофные объекты и водоемы с меньшими концентрациями $P_{\text{общ}}$, а также относительно глубокие и более мелкие водоемы. Взаиморасположение объектов на ординационной диаграмме обусловлено сходством их видового состава (рис. 3, А), а их локализация относительно векторов изменчивости параметров среды позволяет выделять объекты с близкими значениями этих параметров. Это дает возможность выявить определенные закономерности изменения состава диатомовых комплексов в зависимости от заданных параметров среды. Сходство видового состава позволило объединить объекты исследования в 6 групп, характеризующихся определенными показате-

лями среды. Для каждой группы выделены наиболее характерные доминанты ($> 10\%$) и субдоминанты (5–10%) (таблица).

Группу I составили водоемы, имеющие на ординационной диаграмме положительные координаты по оси 1 и отрицательные по оси 2 (рис. 3, А). Это относительно глубокие преимущественно мезоэвтрофные и эвтрофные объекты с относительно невысокими значениями УЭП. В данную группу вошли 3 озера, являющиеся крупнейшими водоемами г. Санкт-Петербурга, а также искусственно созданные ландшафтные водоемы и пруды, расположенные в парковой зоне.

В группу II вошли объекты, имеющие на ординационной диаграмме положительные координаты как по оси 1 (кроме № 4), так и по оси 2. Таким образом, помимо сравнительно больших глубин, более высокой трофности и наиболее высоких значений pH, особенности состава диа-

Основные доминанты ($>10\%$) и субдоминанты (5–10%) в составе диатомовых комплексов исследованных водоемов

Группа ССА			Виды доминант-субдоминантного комплекса
		Параметры среды	
Группа I	диапазон H_{max} 3,8–11 pH 6,86–8,17 $P_{\text{общ}}$ 28–158 УЭП 259–625	ср.знач. H_{max} 5,5 pH 7,56 $P_{\text{общ}}$ 74 УЭП 409	<i>Asterionella formosa</i> , <i>Cyclotella pseudostelligera</i> , <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Cyclostephanos dubius</i> , <i>Cyclotella radiosa</i> , <i>Diatoma tenuis</i>
Группа II	диапазон H_{max} 2,8–9,5 pH 7,42–8,08 $P_{\text{общ}}$ 35–354 УЭП 533–2006	ср.знач. H_{max} 5,7 pH 7,85 $P_{\text{общ}}$ 140 УЭП 1213	<i>Stephanodiscus minutulus</i> , <i>Stephanodiscus hantzschii</i> , <i>Cyclostephanos dubius</i> , <i>Diatoma tenuis</i> , <i>Cyclotella meneghiniana</i> , <i>Cyclotella ocellata</i>
Группа III	диапазон H_{max} 1,6–3,1 pH 7,12–7,90 $P_{\text{общ}}$ 550–1278 УЭП 385–1676	ср.знач. H_{max} 2,5 pH 7,40 $P_{\text{общ}}$ 976 УЭП 760	<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i> , <i>Stephanodiscus hantzschii</i> , <i>Stephanodiscus minutulus</i> , <i>Cyclostephanos invisitatus</i> , <i>Cyclotella meneghiniana</i> , <i>Aulacoseira granulata</i> , <i>Cyclostephanos dubius</i>
Группа IV	диапазон H_{max} 0,7–2,0 pH 7,08–8,04 $P_{\text{общ}}$ 740–1091 УЭП 446–828	ср.знач. H_{max} 1,5 pH 7,39 $P_{\text{общ}}$ 862 УЭП 556	<i>Achnanthes hungarica</i> , <i>Cyclotella pseudostelligera</i> , <i>Navicula minima</i> , <i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Cocconeis placentula</i> et var. <i>euglypta</i> , <i>Cyclostephanos invisitatus</i> , <i>Cyclotella meneghiniana</i> , <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i> , <i>Navicula seminulum</i>
Группа V	диапазон H_{max} 0,7–2,6 pH 6,74–8,03 $P_{\text{общ}}$ 107–312 УЭП 303–690	ср.знач. H_{max} 1,6 pH 7,44 $P_{\text{общ}}$ 188 УЭП 443	<i>Stephanodiscus minutulus</i> , <i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Cocconeis placentula</i> et var. <i>euglypta</i> , <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i> , <i>Cyclotella meneghiniana</i> , <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>capucina</i> , <i>Stephanodiscus hantzschii</i> , <i>Achnanthes hungarica</i> , <i>Achnanthes lanceolata</i> , <i>Cyclostephanos invisitatus</i> , <i>Cyclotella pseudostelligera</i> , <i>Navicula minima</i> , <i>Navicula seminulum</i> , <i>Nitzschia palea</i>
Группа VI	диапазон H_{max} 1,3–3,3 pH 6,59–8,54 $P_{\text{общ}}$ 12–335 УЭП 68–747	ср.знач. H_{max} 2,0 pH 7,4 $P_{\text{общ}}$ 97 УЭП 312	<i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Fragilaria elliptica</i> , <i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i> , <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>rumpens</i> , <i>Fragilaria pinnata</i> , <i>Cocconeis placentula</i> et var. <i>euglypta</i> , <i>Cymbella microcephala</i> , <i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracilis</i> , <i>Fragilaria exigua</i> , <i>Fragilaria pinnata</i> , <i>Gomphonema parvulum</i> , <i>Navicula cryptocephala</i>

ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВА ДИАТОМОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОДОЕМОВ МЕГАПОЛИСА

томовых комплексов здесь также в значительной степени определяются крайне высокими значениями УЭП (рис. 3, А). Это водоемы, образовавшиеся на месте карьеров по добыче глины, ландшафтные водоемы и пруды парковой зоны.

Группа III объединяет объекты с положительными, в целом, достаточно высокими значениями координат по оси 1 и также положительными, но небольшими значениями по оси 2. В целом это значительно менее глубокие водоемы по сравнению с объектами двух предыдущих групп, гипертрофные по содержанию $P_{общ}$, с высокими значениями УЭП. В группу вошли преимущественно водоемы, расположенные в парковой зоне, ландшафтные водоемы, а также ряд прудов водохранилищ.

Водоемы, вошедшие в группу IV, по своим характеристикам в целом сходны с объектами группы III: это гипертрофные объекты с высокими значениями УЭП, однако, их отрицательные координаты по оси 2 обусловлены меньшими глубинами (рис. 3, А). Аналогично предыдущей группе, сюда вошли водоемы парковой зоны, ландшафтные водоемы и пруды-водохранилища.

В отличие от объектов предыдущей группы, водоемам группы V, при малых глубинах, свойственны значительно более низкие концентрации $P_{общ}$ и значения УЭП. Группа также объединяет ландшафтные водоемы, пруды парковой зоны, некоторые пруды-водохранилища.

Наиболее многочисленна группа VI, объединившая

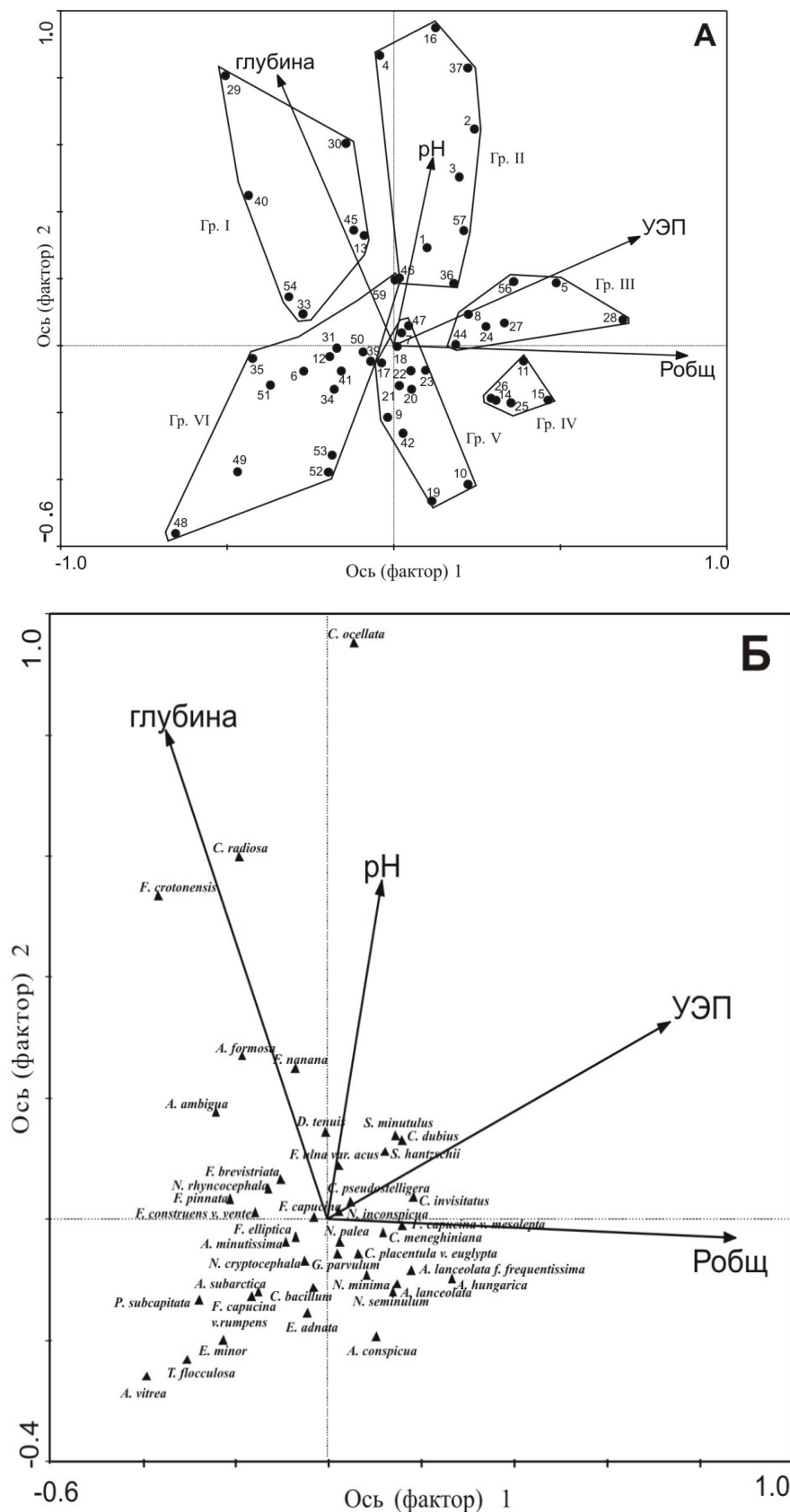


Рис. 3. Ординационная диаграмма канонического анализа соответствий: А – взаиморасположения объектов исследования и параметров среды; Б – распространения основных видов диатомей в зависимости от параметров среды

водоемы, имеющие отрицательные координаты по обеим осям (кроме №59). Для них характерны малые глубины, сравнительно невысокие концентрации $P_{\text{общ}}$ и в целом низкие значения УЭП. Это, преимущественно, водоемы городских парков и скверов, основная антропогенная нагрузка на которые, по-видимому, обусловлена рекреационным использованием.

Положение основных видов диатомей относительно канонических осей и векторов изменчивости параметров среды на ординационной диаграмме характеризует зависимость их распространения от экологических факторов и позволяет сделать вывод о надежности использования тех или иных видов в качестве биоиндикаторов (рис. 3, Б). Поскольку начало координат ординационной диаграммы отмечает среднее значение параметра водной среды, виды, расположенные в той части ординационного пространства, в которую направлен вектор изменчивости данного параметра, характерны для объектов, в которых его значения превышают среднее для выборки, и наоборот. Проекция вида на линию вектора изменчивости параметра среды аппроксимирует оптимальное значение данного параметра для указанного вида.

Таким образом, канонический анализ соответствий позволил установить определенные закономерности распространения некоторых основных таксонов в водоемах г. Санкт-Петербурга, обусловленные их экологическими предпочтениями. Так планктонные *Asterionella formosa* Hass., *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Cyclotella radiosа* (Grun.) Lemm. массово развиваются в мезоэвтрофных и эвтрофных объектах ($P_{\text{общ}} < 100$ мкг/л) с глубинами более 3 м (рис. 2, 3, Б). Относительно глубоководные (5 м и более) эвтрофные условия в сочетании с крайне высокими значениями УЭП, вероятно, благоприятствуют развитию планктонных *Cyclotella ocellata* Pant. и *Diatoma tenuis* Ag. Распространению планктонных *Stephanodiscus hantzschii* Grun. и *S. minutulus* (Kütz.) Cl. & Möll., очевидно, благоприятствуют содержание $P_{\text{общ}}$, более высокое, чем среднее значение для выборки (> 300 мкг/л), и высокая УЭП. Однако их присутствие в составе доминант-субдоминантного комплекса водоемов группы II свидетельствует о том, что глубина, и вероятно, более высокий pH также являются определяющими для их развития. В свою очередь планктонные *Cyclostephanos invisitatus* (Hohn & Hel.) Ther., Stoerm. & Håk., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., обростатели *Achnanthes hungarica* Grun., *A. lanceolata* (Grun.) Hust., *Fragilaria capucina* var. *mesolepta* Rabh. и донные *Navicula minima* Grun. и *N. seminulum* Grun.,

по-видимому, предпочитают гипертрофные и неглубокие (2–3 м и менее) объекты с высокой УЭП. Обростатель *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehr.) Cl. тяготеет к более мелководным объектам (< 3 м) с относительно менее высокими концентрациями $P_{\text{общ}}$. Планктонные *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round и *Cyclotella pseudostelligera* Hust. отмечаются в широком диапазоне условий (рис. 3, Б), однако, для первого в большей степени определяющими являются содержание $P_{\text{общ}}$ (> 100 мкг/л) и глубина ($> 1,5–2$ м). Обростатель *Achnanthes minutissima* Kütz., отмечаемый практически во всех водоемах, достигает максимальной численности в объектах с наименьшими глубинами (менее 2 м) и, как правило, с содержанием $P_{\text{общ}} < 100$ мкг/л. Для обростателей *F. capucina* var. *rumpens* (Kütz.) Lange-B., *F. construens* var. *venter* (Ehr.) Hust., *F. elliptica* Schum., *F. pinnata* Ehr., *Eunotia minor* (Kütz.) Grun., *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz., достигающих наибольшей численности в основном в водоемах группы VI, также более благоприятными являются специфические условия, характерные для данной группы объектов: небольшие глубины (в среднем < 2 м) и сравнительно невысокие концентрации $P_{\text{общ}}$, обусловленные меньшей антропогенной нагрузкой. Донные *Nitzschia inconspicua* Grun. и *N. palea* (Kütz.) W. Sm. являются убиквистами в рассматриваемой выборке объектов, не демонстрируя отчетливых экологических предпочтений.

Выделяя в качестве основных факторов среды, определяющих состав диатомовых комплексов водоемов г. Санкт-Петербурга, помимо содержания $P_{\text{общ}}$, максимальную глубину и УЭП, необходимо учитывать следующее. Известно, что глубина является «составным» параметром, определяющим целый ряд других показателей водной среды [8], влияющих на состав диатомовых комплексов. Следовательно, отмечаемая приуроченность отдельных видов к более глубоким или более мелким водоемам, возможно, обусловлена не непосредственным значением этого показателя, а связанными с ним характеристиками водного объекта (глубина фотической зоны, доступность/тип субстрата для колонизации, содержание биогенов и др.). В свою очередь повышенные значения УЭП, присущие для городских водоемов, могут быть связаны как с загрязнением (например, высоким содержанием фосфатов), так и с особенностями состава рыхлых осадков, слагающих котловины водоемов [3]. В частности, крайне высокая УЭП, характерная для водоемов, представляющих собой бывшие карьеры по добыче глины, может быть обусловлена присутствием в воде

глинистых частиц, несущих электрический заряд. Таким образом, несмотря на статистическую значимость всех заданных параметров, наиболее уверенно можно говорить о том, что особенности распределения видов диатомей в составе диатомовых комплексов водоемов г. Санкт-Петербурга определяются содержанием общего фосфора. Для уточнения роли глубины и удельной электропроводности и установления более четких экологических предпочтений видов необходимо использовать дополнительные параметры среды, в том числе данные об ионном составе вод городских водоемов, прозрачности, содержании загрязняющих веществ.

Заключение

Изучение состава диатомовых комплексов водоемов г. Санкт-Петербурга показало, что многие виды диатомей способны достигать высокой численности в водоемах с различными характеристиками. Применение канонического анализа соответствий позволило разделить исследуемые водоемы на группы, характеризующиеся сходными параметрами водной среды и составом диатомовых комплексов. Наиболее значимыми факторами, определяющими особенности состава диатомовых комплексов, являются, с одной стороны, содержание $P_{\text{общ}}$ и УЭП, с другой – глубина объекта. Были установлены закономерности распространения основных видов диатомей в водоемах г. Санкт-Петербурга, связанные с их экологическими предпочтениями. Полученные результаты лишней раз подтверждают тот факт, что диатомовые водоросли являются надежными индикаторами условий среды. Однако, оценивая экологическое состояние водного объекта на основе данных диатомового анализа, нужно помнить о том, что многие виды способны существовать в широком диапазоне. Кроме того, необходимо учитывать, что среда обитания

оказывает комплексное воздействие на организм, и стремиться в каждом конкретном случае выделить тот фактор(ы), который в наибольшей степени определяет массовое развитие того или иного вида.

Автор признателен сотрудникам лаборатории гидрохимии ИНОЗ РАН к.г.н. Н.В. Игнатъевой и О.М. Сусаревой за предоставленные данные гидрохимических анализов.

Литература

1. *Водные объекты Санкт-Петербурга* / Под ред. С.А. Кондратьева, Г.Т. Фрумина. – СПб., 2002. – 252 с.
2. *Birks H.J.B.* Numerical methods for the analysis of diatom assemblage data. In: *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences.* (ed. by J.P. Smol, E.F. Stoermer). – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – P. 23–54.
3. *Румянцев В.А., Игнатъева Н.В.* Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах. – СПб.: ВВМ, 2006. – 152 с.
4. *Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. – Л.: Наука, 1985. – 244 с.
5. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae // *Süßwasserflora von Mitteleuropa.* Band 2/1–4. / Ed. by H. Ettl, J. Gerloff, H. Heying, D. Mollenhauer. – Stuttgart-Jena: G. Fisher Verlag, 1986–1991.
6. *ter Braak C.J.F., Verdonschot P.F.M.* Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology // *Aquat. Sci.*, – 1995. – Vol. 57, № 3. – P. 255–289.
7. *ter Braak C.J.F., Šmilauer P.* CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows. User's guide software for canonical community ordination (version 4.5). – New York: Microcomputer Power, 2002. – 500 p.
8. *Juggins S.* Quantitative reconstructions in palaeolimnology: new paradigm or sick science? // *Quat. Sci. Rev.* – 2013 – Vol. 64. – P. 20–32.

Поступила в редакцию 14.11.201

Физико-химическая биология

УДК 577.11:612.017.2

Роль гамма-глутамилтрансферазы в адаптиогенезе и общей резистентности организма человека, реализуемая посредством участия в нейромедиаторном балансе и структурно-регуляторных функциях соединительной ткани (часть I)

Т.В. Чернбровкина, Б.М. Кершенгольц*

ИПК Федерального медико-биологического агентства России;
Наркологический диспансер № 4 (Филиал № 4) ГБУЗ «Московский НПЦ наркологии» ДЗ Москвы.
*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

На основе обзора данных литературы и результатов собственных наблюдений анализируются возможные пути и механизмы участия полифункциональной ферментной системы гамма-глутамилтрансферазы (ГГТ) в регуляции общей резистентности организма, включая аллергическую готовность, толерантность к алкоголю и другим психоактивным субстанциям, и в механизмах развития системных заболеваний, связанных с дисплазией соединительной ткани. Приводится ряд клинических и экспериментальных доказательств в пользу интерпретации адаптационной сущности ферментной ГГТ при различных стрессовых состояниях напряжения, алкогольной интоксикации и алкоголизме, наркоманиях. Обсуждаются причинно-следственные взаимосвязи между гипоактивностью ГГТ и развитием стресс-ассоциированных расстройств, а также заболеваний в пубертате у подростков и взрослых, включая иммунодефицитные состояния, метаболический синдром, синдром полигланулярной недостаточности и другие проявления патоморфоза системной патологии (коллагенозов). Намечаются подходы к разработке методов профилактики вышеназванных нарушений реактивности и заболеваний организма и эффективных средств немедикаментозной терапии, включая энзимотерапию, физио- и рефлексотерапию.

Ключевые слова: гамма-глутамилтрансфераза, адаптиогенез, соединительная ткань, резистентность, гамма-глутамилгистамин, системные болезни, энзимодиагностика, энзимотерапия.

Possible role of gamma-glutamyltransferase (GGT) in individual sensibility to alcohol and alcohol-induced pathology such, mechanisms of organism resistances regulation including allergic sensitiveness and some forms of collagen's diseases development are discussed. This supposition is based on the next reasons: 1. The detoxification role of GGT may be conditioned by the participating in glutathione metabolism. 2. GGT can regulate the cells and tissues amino acids pools by facilitation their transport through the cell membranes as known the GGT- regulating function in blood-brain barriers permeability. 3. The enzyme GGT-system participates in collagen polypeptides complex synthesis and catabolism processes and this way is able to regulate the collagen metabolic state and diseases of connective tissue. 4. GGT may be included into mechanisms of some physiological effects of histamine by means of chemical binding and deactivation of high histamine concentration with the gamma-glutamylhistamine producing. It is a molecular base of antiallergic efficiency of GGT. 5. Besides GGT possibly participates in concentration level and function balances of neuromediators (adrenaline, noradrenalin, serotonin, dopamine, histamine) which are substrates of sympathetic and parasympathetic nervous systems. 6. It was found that the GGT level is differ in T- and B-subclasses of lymphocytes during some infection and other diseases. So in normal physiological GGT may be trigger enzyme system for the resistance and immune competence optimal state. Abnormal blood and tissues GGT

ЧЕРНБРОВКИНА Тамара Васильевна – д. м.н., проф., chernobrovkina44@mail.ru; *КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич – д.б.н., проф., зам.директора, kerschen@mail.ru.

(very high or low activity) may be effective marker in diagnostic and prognostic problems, for example collagen diseases connected with deregulations (destruction, dysplasia) of connective tissues. Perspectives porpoise steps and new mechanisms of some drugs and non-medicamentous factors in regulation of the GGT state may be useful for enzyme therapy in pathological processes as such as in rehabilitation.

Key words: gamma-glutamyltransferase, adaptation reactivity, systemic resistances, gamma-glutamylhistamine, connective tissue diseases, enzyme diagnostic, enzyme therapy.

Введение

Фермент гамма-глутамилтрансфераза (ГГТ) известен как один из чувствительных биологических маркеров злоупотребления алкоголем и успешно применяется в дополнение к клинической симптоматике для объективизации диагностики алкоголизма и контроля ремиссионного статуса больных [14, 18, 20, 23, 27, 31, 33, 38, 40 и др.]. С середины 70-х годов нами рассматривались гипотетические механизмы алкоголь-индуцированной гиперферментемии ГГТ, которые расходились с предпочтительной в то время в мировой научной литературе интерпретацией, связывающей феномен повышенной активности ГГТ в крови с алкогольным поражением печени. Оказалось, что реакция ГГТ на алкоголизацию и различные виды наркотизации носит качественно разнонаправленный и количественно отличающийся характер, несмотря на поражение печени у обследуемых нами больных зависимостями. Более того, у некоторых больных алкоголизмом с явным, гистоморфологически подтвержденным заболеванием печени активность ГГТ сыворотки крови остается в пределах нормы или даже снижена, не согласуясь при этом с поведением других печеночных маркеров. И, напротив, как выяснилось при испытании практически здоровых добровольцев, после однократной нагрузки алкоголем (даже в нетоксической дозе) на фоне отсутствия у них клинических и инструментально подтвержденных признаков гепатопатии активность ГГТ крови может достоверно увеличиваться по сравнению с уровнем до приема алкоголя. Эти и многие другие данные указывали на существование нескольких механизмов поступления в кровь, причин гиперферментемии ГГТ, подробно освещенных в статьях и монографиях [14, 21, 23, 24, 28 (т. 1, гл. 3.4), 31, 35], что послужило основанием для дальнейшего изучения механизмов и типов ферментемии ГГТ, их физиологического и клинического значения, расширения области эффективного диагностического использования в профилактической и клинической медицине.

Биомедицинские аспекты вызываемых алкоголем и наркотиками ферментемий ГГТ, раскрывающие его общебиологическую роль в контексте адаптиогенеза

На примере поведения полифункционального широко распространенного в организме человека ферментного комплекса ГГТ, наиболее рано и заметно реагирующего на присутствие алкоголя и неалкогольных психоактивных веществ (ПАВ) в организме человека, с 60-х годов XX в. активно изучаются фундаментальные и прикладные аспекты биохимической энзимологии в наркологии и общей медицине. Главные вопросы, формулируемые при этом, следующие: как и почему эта ферментная система оказалась в ряду самых чувствительных к действию химических факторов окружающей среды; каковы причины изменения в крови активности (или количества) ГГТ; биологический смысл гипер- или гипоферментемии при употреблении ПАВ; индивидуальные особенности этой реакции и факторы, их определяющие? Каковы конкретная роль, стратегия и механизмы биохимической адаптации с участием ферментной системы ГГТ при алкоголизме, наркоманиях и других патологических расстройствах и заболеваниях или неблагоприятных воздействиях окружающей среды?

Результаты многолетних исследований (за 10-летний период нами обследовано 1680 лиц мужского пола в возрасте от 14 до 62 лет, злоупотребляющих алкоголем и находящихся на разных этапах формирования алкогольной болезни) выявили тесную связь структурно-функционального состояния изоферментного комплекса ГГТ с толерантностью к алкоголю, прогрессивностью алкоголизма и его коморбидными осложнениями. Кроме того, проведенное в экспедиционных условиях с Новосибирским институтом терапии СО РАМН на Чукотке массивное клинко-лабораторное изучение состояния здоровья наркологических больных среди коренных и пришлых жителей и параллельные контрольные исследования взрослых мужчин условно здоровой категории обнаружили существование сложных взаимоотношений между

уровнем активности ГГТ в крови и биохимическими и клиническими признаками дисфункции надпочечников (по уровню кортизола), состояния гормонов гипофиза (АКТГ, ФСГ, ЛСГ), поджелудочной (инсулин) и щитовидной (ТСГ, Т₄) желёз, с одной стороны, и вариабельностью индивидуальных ответов организма на экстремальные воздействия среды (по состоянию кардиореспираторной, органов пищеварительной систем), с другой. Из факторов среды учитывались нагрузки, испытываемые в геоклиматических условиях (температурные, метеофакторы), стресс-раздражители психической, физической и химической природы, включая употребление алкоголя и других психоактивных веществ, а также некоторые вредные производственные факторы (контакты с токсическими веществами, шумы, укачивание, перегревание, переохлаждение). Анализ этих и данных мировой литературы [1, 14, 20, 21, 22, 24, 28 (т. 2), 30, 31, 37, 39] позволил нам предположить, что комплекс из семи фракций (изоферментов?) ГГТ, электрофоретически разделяемых в ПААГ и обозначенных соответственно распределению белковых фракций крови (от преальбуминов до γ -глобулинов), может принадлежать к филогенетической системе обеспечения общей резистентности организма через участие в детоксицирующей, транспортной, пептидсинтезирующей и иммуномодулирующей функциях организма (рис.1) по перечисленным ниже путям и механизмам.

1. Через участие в превращениях глутатиона фермент может опосредовать процессы детоксикации в организме с помощью SH-содержащих биоконпонентов [1, 14, 35, 41, 42].

2. Облегчая трансмембранный транспорт веществ путем образования их гамма-глутамильных производных [1, 14, 41], ферментная система ГГТ регулирует поддержание внутриклеточного аминокислотного фонда, пептидный и белковый обмен в целом и, в частности, определяет проницаемость ГЭБ и других мембран для необходимых субстратов.

3. Входя в состав сбалансированного пептидазного комплекса перикапиллярных структур и соединительной ткани (СТ), функциональная мощность системы ГГТ способна регулировать этапы обмена основного вещества

СТ – коллагена, что при дефицитарных состояниях, истощении или функциональной ригидности ГГТ, вероятно, влечет за собой усиление фибриллогенеза и склерозирования плазматических мембран, стромы тканей и сосудистых стенок [1, 17, 23].

4. Вероятна также роль ГГТ как гликопротеида в регуляции иммунных ответов на клеточном уровне, учитывая обнаруженную локализацию фермента в субфракциях Т- и В-лимфоцитов и отмеченное при ряде заболеваний качественно-количественное перераспределение сialiзированных и десialiзированных форм ГГТ в этих лимфоцитарных субпопуляциях [23, 24].

5. Способность ГГТ инактивировать тканевый гормон и биорегулятор гистамин опосредует детоксицирующую, антиаллергенную функции и иммуномодуляторную роль на тканевом и гуморальном уровнях [11, 12, 37, 43].

6. Участие ГГТ в выведении ацетальдегида (АЦА) почками путем образования комплекса с цистеинил-глицином (акцептором АЦА) [36] также подтверждает его детоксицирующую роль в организме.

Вышеперечисленное в пп. 1–6 послужило основанием для формулирования обобщающей гипотетической концепции [20, 21, 23], согласно которой *полифункциональная ГГТ-система является одним из элементов молекулярно-клеточных блоков капилляро-соединительноткан-*

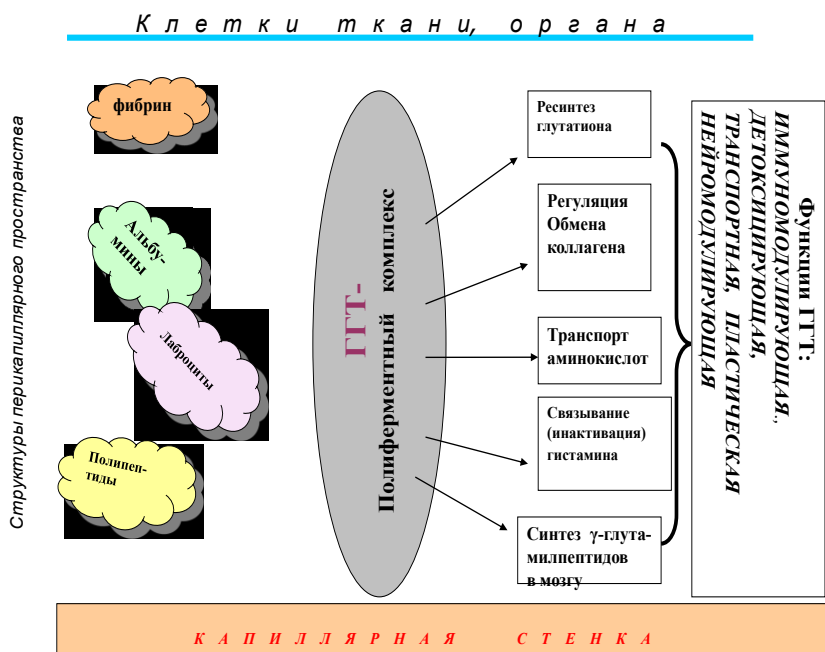


Рис.1 Локализация полифункционального ферментного комплекса ГГТ, обуславливающая его участие в проницаемости капилляро-соединительнотканых структур и формировании базисных синдромов полиорганной патологии – гистаминемии и капилляро-трофической недостаточности (КТН)

ной структуры (КСС) или единой ферментно-трофической системы (ЕФТС) (по терминологии, предложенной В.П.Казначеевым, А.А. Дзинским, М.Я., Субботиным [5–7]), или их аналогов: «сосудисто-тканевой единицы», по Т.А. Григорьевой; «гисто-капиллярного единства», по Businko; «гистиона», по Letterer (цит. по [10], с. 93).

В соответствии с более поздними теориями о функциональных блоках В.Т. Ивашкина с соавторами [4] и региональных трофических контурах Г.Н.Крыжановского [3], перечисленные молекулярно-клеточные блоки составляют универсальную структурно-функциональную единицу (надмолекулярный комплекс) и определяют элементарные функции перикапиллярного пространства во всех органах и системах. Через различные комбинации и количественные соотношения этих одноименных функциональных блоков и их субъединиц определяется тканевая специализация клеток и органов. Данные представления сегодня признаны как базисные в фундаментальной медицине и применяются для классификации и интерпретации многих физиологических, адаптационных, предпатологических и клинко-патологических феноменов. При этом, однако, физиологическое и патогенетическое значение системы ГГТ в этих универсальных структурно-функциональных блоках явно недоисследовано, что и определило цель настоящего сообщения.

Принимая во внимание известные гистоморфологические данные и физико-химические свойства ГГТ, нами предполагалось [23, 28], что следствиями нарушения состояния этой ферментной системы могут быть опасная дисрегуляция иммунной, пластической, барьерной и других функций отдельных органов и организма в целом, что определяет, по представлениям классической патофизиологии, основу развития диспротеинемий, дезорганизации соединительнотканых выстилок в сосудах, органах и плазматических оболочках паренхиматозных тканей и органов. Так, при количественном дефиците или функциональной ригидности ГГТ-системы теоретически обоснованно и реально высоковероятно развитие синдромов *капилляро-трофической недостаточности* [5–7] или *гистогематического синдрома*, по Г.М. Покалеву [16], а в современной трактовке – многообразных проявлений *дисрегуляторной патологии*, по Г.Н. Крыжановскому [3].

В отношении печени и почек накоплена довольно обширная информация о распределении в них и функциях ГГТ. Показанные преимущественная локализация фермента в щеточных каемках кишечного и почечного эпителия, выстилке желчонных протоков, взаимодействие

с ядами путресцином, кадаверином, способность его связывания с желчными кислотами и солибилизирующий эффект последних, связывание ацетальдегида и выведение почками при посредстве ГГТ [1,14,20 и др.] открывают возможные дополнительные механизмы участия сиалопротеида ГГТ в свойствах, определяющих структуру и функции слизистого геля и механизмы воспалительных и опухолевых заболеваний желудочно-кишечного тракта.

В других же тканях и органах (например, в ткани семенников, поджелудочной железы, щитовидной железы, гладких и поперечно-полосатых мышц и др.), а также в биологических средах (околоплодных водах, слезном выделяемом) роль ГГТ изучена пока в сравнительно меньшей степени или неизвестна и ждет своих исследователей.

Присутствие высоких концентраций фермента ГГТ в капиллярах серого и белого вещества, мозжечка и продолговатого мозга и в эпителиальных клетках хориоидного сплетения позволяет говорить о роли ГГТ в транспорте аминокислот через ГЭБ посредством цикла реакций их пептидизации с гамма-глутамильным остатком глутатиона и возможной таким образом «откачке» аминокислот из внеклеточных жидкостей головного мозга (интерстиция) в кровь [1, 31, 42]. Впервые это, по замечанию М. Бредбери [1], «остроумное предположение» было высказано в 1974 г. S.Tate и A.Meister [41], но оно требовало экспериментального и клинического подтверждения, и сегодня еще остается актуальным вопросом, тем более что осуществление этого механизма энергозатратно, поскольку происходит против градиента концентрации. Кстати, облегчение состояния похмельного синдрома (головной боли, тошноты, гипертензии), достигаемое приемом рассолов, по видимому, объясняется не только и не столько восстановлением нарушенного электролитного баланса, но и удовлетворением увеличенной потребности в Na для ион-зависимых процессов транспорта через ГЭБ, в том числе транспорта и аминов, например, гистамина, участвующего в генезе и головной боли, и сосудистых эффектов в ткани мозга, как и в других органах и тканях. Обнаруженные в мозге γ -глутамилолигопептиды и γ -глутамил-производные аминов, функция которых пока мало выяснена [I. Sano и соавт., 1966 (цит. по [23])], могут представлять собой разновидность активных нейропептидов, их предшественники или дериваты, предположительно задействованные в процессах памяти. Психофармакологические свойства, физиологическая и патогенетическая роль нейропептидов и полиаминов продолжают изучаться и обсуждаться нейробиологами, нейрофизиологами,

биологами, психиатрами, в том числе в связи с механизмами формирования патологической зависимости от ПАВ и толерантности к ним.

Кроме вышеуказанного, по-видимому, изоферментный комплекс ГГТ выполняет регулируемую роль в трансмембранной циркуляции и реакциях глутамилирования катехоламинов и других биогенных аминов (дофамина, адреналина, серотонина, гистамина и др.) и таким образом может выполнять роль триггерной системы, поддерживая концентрационный и функциональный баланс нейромедиаторов антагонистического (симпатического и парасимпатического) отделов вегетативной нервной регуляции как в норме, так и при изменениях их количественных соотношений и активности в условиях адаптации, психосоматического перенапряжения при различных внешних нагрузках, предпатологических состояниях, стрессах различной природы – химической, физической и психической, например, при развитии синдромов постинтоксикации, посттравматического, абстинентного, патологического влечения, физического и психофизиологического переутомления и, возможно, синдрома *полярного напряжения* [8, 9, 15, 19, 23, 37]. В таких ситуациях, с одной стороны, функционирование ГГТ может препятствовать «утечке» биогенных аминов из нервной ткани [1, с. 425], а с другой – обеспечивать физическое «отмывание» мозга, откачивание и химическое обезвреживание аминов и других нейромедиаторов и нервных ядов (путем связывания и образования γ -глутамильных производных) при их избыточном поступлении извне (как, например, поступления гистамина или имидазола с алкогольными напитками и продуктами питания [34]) или неумеренного выхода из эндогенных депо, что требует немедленной их эвакуации и/или инактивации [2, 15, 19, 21, 31, 39, 43].

Участие мембраносвязанного фермента в оксопролиновом цикле, функционирующем в пристеночном к мембранам клеток пространстве, по-видимому, обеспечивает (оптимизирует, регулирует) также полноценный обмен коллагена. Вероятно, что при дефиците фермента или количественной разбалансировке его в соотношении с другими пептидазами во вне- и внутриклеточной средах (с протеолитическими и муколитическими ферментами, с одной стороны, и γ -глутамилциклотрансферазой и оксопролиназой – с другой) в клетках накапливается оксопролин, что является биохимическим маркером нарушения коллагенового обмена [1, 4, 17]. Процессы синтеза–распада основного вещества СТ при этом могут «застрывать» на промежуточных этапах фибриллогенеза, образования незрелых форм коллагеновых волокон, иници-

рующих склерогенное перерождение в сосудах и тканях. Действительно, именно при алкогольном фиброзе и циррозе многие исследователи отмечали относительно слабо выраженную гиперферментемию ГГТ [М. Yamauchi и соавт., 1984; G. Giovanni и соавт., 1989; и др. (цит. по [23])], а некоторые – даже обратную зависимость активности ГГТ от степени тяжести алкогольного поражения печени, т.е. её снижение при прогрессировании фиброза и цирроза [R. Teschke и соавт., 1979 (цит. по [23])].

В аддиктологии – науке о заболеваниях, характеризующихся патологической зависимостью, в частности, зависимостью от ПАВ, только функционально-динамический подход к диагностической интерпретации энзимопатий открывает принципиально новый взгляд на механизм алкоголь-индуцированной гиперферментемии ГГТ, позволяя выделить в структуре этого феномена адаптационную и патогенетическую составляющие.

Дело в том, что алкоголизация (даже эпизодическая) вызывает относительную гистаминемию, по крайней мере, по причинам, подробно перечисленным нами в монографиях [23, 28], в том числе: вследствие прямого эффекта этилового алкоголя как гистаминолибератора и высвобождения гистамина из депо при алкогольной нагрузке; вследствие тормозящего действия алкоголя на обмен гистамина с участием диаминооксидазы; и вследствие того, что многие алкогольные напитки сами содержат гистамин или его предшественник гистидин и служат источником повышения последних в крови и тканях [34]. Принимая во внимание эти источники и причины повышения гистаминемии, увеличение активности ГГТ в крови при разовом употреблении алкоголя (при т.н. острой алкогольной нагрузке) у лиц, не злоупотребляющих алкоголем, а также на начальных этапах формирования алкогольной зависимости можно объяснить защитной функцией фермента, направленной на связывание и дезактивацию избыточного гистамина в крови и тканях.

Таким образом можно рассматривать феномен гиперферментемии ГГТ не как признак гепатопатологии, а как защитную, адаптационную реакцию организма на вызываемую алкоголем абсолютную (когда превышаются границы физиологической нормы) или относительную (когда превышает уровень до приема алкоголя) гистаминемию. В случаях систематического употребления алкоголя (злоупотребления) роль нефизиологических концентраций гистамина, как и диспротеинемий, и других метаболических сдвигов в патогенезе алкогольной болезни неоспорима и чрезвычайно обширна – и в формировании «наркоманического гомеостаза»,

поддерживающего циклически обостряющееся патологическое влечение, и в развитии коморбидной отягощенности основного аддиктивного заболевания. Гиперферментемия ГГТ при этом отражает уже не только и не столько адаптационную сущность, но и находит патогенетическое объяснение. Наиболее отчетливо это прослеживается на примере обсуждения роли ГГТ в развитии алкогольного поражения печени (АПП).

При алкоголизме страдают и выделительная, и белоксинтезирующая, и метаболизирующая функции печени. Морфологическим субстратом АПП являются клеточные мембраны, митохондрии, эпителий желчевыводящих протоков и межклеточная соединительная ткань. *Функции ГГТ позволяют предположить включение фермента в различные механизмы АПП* (гиперметаболическое состояние гепатоцитов, холестаз, накопление продуктов ПОЛ и др.). Наиболее интересным в изучаемом вопросе является обсуждение возможной роли ГГТ в патогенезе острых воспалительных реакций и в процессах цирротического перерождения ткани печени.

Как известно, алкоголь подавляет оборот коллагена в печени [Х.Х. Мансуров, Г.К. Мироджов, 1985 (цит. по [23])]. Причем одни авторы считают основной причиной накопления коллагена стимуляцию его синтеза, в частности под действием продуктов распада гибнущих гепатоцитов. По мнению других, за счет увеличения распада коллагена идет накопление фибрилл [K. Henley и соавт., 1977; S. Mann и соавт., 1979; H. Orrego и соавт., 1979; A. Arranto и соавт., 1982; S. Kato и соавт., 1985(цит. по [23])]. Так или иначе, под действием алкоголя отмечается накопление промежуточных продуктов синтеза или распада коллагена – фибрилл (когда или распад коллагена тормозится, или синтез его стимулируется на стадии образования фибрилл), которые активируют процесс аутоиммунного поражения ткани, органа. Какое место занимает ГГТ в этой патогенетической цепи?

Предполагаемое участие системы ГГТ в патогенезе АПП может осуществляться по двум путям. Первый путь – это создание дисбаланса в системе синтеза–распада коллагена, когда вследствие слишком малой (недостаточной) или, наоборот, слишком высокой (индуцированной) активности ГГТ нарушается кинетика этапов синтеза и катаболизма коллагена; второй – гистаминовый путь – это вазодизрегуляторные расстройства с последующими нарушениями микроциркуляции, обмена и трофики ткани. Понятно, что активность ГГТ в межклеточном пространстве и в клеточной мембране должна быть в соответствии, с одной стороны, с актив-

ностью внутриклеточной γ -глутамил-цикло-трансферазы (ГГЦТ), с другой – с активностью внеклеточных пролингидроксилазы, коллагеназ и других пептидаз, расщепляющих коллаген. Как только эти соответствия нарушаются (например, в случае падения активности ГГТ при стрессе или в случае ее увеличения – при индукции алкоголем или другими агентами), начинает активироваться фибриллогенез: в первом случае – в связи с торможением распада коллагена на уровне образования фибрилл и высокомолекулярных пептидов, во-втором – в связи с увеличенной поставкой аминокислот и пептидов на построение фибрилл. *Накопление же фибрилл по любому из этих вариантов при хроническом и некомпенсированном метаболическом дисбалансе может, в свою очередь, запустить иммунные механизмы органопатологии и приводить к системным коллагенозам.*

С учетом индуцируемой гиперферментемии ГГТ при алкогольной зависимости на этапе I–II стадий наиболее вероятно активация синтеза коллагеновых фибрилл. При истощении же выполняющей барьерные функции системы ГГТ в терминальных стадиях алкоголизма вероятно торможение катаболизма коллагена на уровне образования фибрилл и аполярных пептидов. При любом из типов энзимопатий ГГТ процессы синтеза–катаболизма коллагена как бы «застревают» на этапе образования фибрилл и аполярных пептидов, накопление которых инициирует процессы образования промежуточных филаментов, аутоантител, специфических телец Маллори, мукоидное набухание и фибриноидные отложения в межклеточном соединительнотканном перикапиллярном пространстве. Сначала эти процессы развиваются в зонах наиболее интенсивной циркуляции и обмена и одновременно наиболее чувствительных к гипоксии – гепатоцитах центрилобулярных зон, затем распространяются к периферии долек, долей печени, постепенно сопровождаясь перерождением и склерозированием всего органа. И, наконец, транспептидазная функция ГГТ может опосредовать нарушения обмена коллагена (изменять соотношение процессов синтеза коллагена и коллагенолиза) путем снижения скорости оборота и уменьшения пула глутатиона в печени. Предполагается, что истощение глутатиона в печени, наступающее при хронической алкогольной интоксикации, может играть патогенетическую роль в ускоренном распаде даже вновь синтезированного коллагена с участием катепсинов [42].

В развитие концепции об адаптационной и патогенетической роли ферментемий системы ГГТ также было показано, что у людей уровень

активности ГТТ сыворотки крови коррелирует с индивидуальной переносимостью нагрузки этиловым алкоголем, и на основании результатов исследования представительных популяционных групп был разработан и предложен в практическое здравоохранение лабораторный способ определения толерантности к алкоголю [23, 25, 27, 28]. При исследовании практически здоровых мужчин-доноров оказалось, что лица с гипоактивностью ГТТ (конституционально или экзогенно обусловленной) плохо переносят нагрузку алкоголем (гиперчувствительны вплоть до интолерантности), у них легко развиваются реакции алкогольной интоксикации по типу гипоталамического синдрома (а по сути – соответствующей гистаминовой интоксикации): покраснение лица, головная боль, тахикардия, колебания (повышение/понижение) артериального давления, подташнивание, рвота и/или абдоминальный дискомфорт.

Гиперактивные по уровню ГТТ в крови индивиды, напротив, проявляют относительную устойчивость к алкогольным нагрузкам. Но при этом ни те, ни другие не защищены от алкоголизма, хотя уже на ранних этапах формирования алкогольной зависимости у обладателей этих противоположных конституциональных особенностей биохимического гомеостаза закладываются дифференцированные основы последующего прогрессирования соматоневрологических коморбидных осложнений хронической алкогольной болезни.

Также были обоснованы теоретически и подкреплены клиническими наблюдениями зависимость прогрессивности (темпов развития) и злокачественности (коморбидной отягощенности) алкогольной болезни от функциональной полноценности ферментной системы ГТТ: низкий уровень активности предопределял и объяснял высокую чувствительность (низкую толерантность) к алкоголю и повышенную уязвимость органов и систем при алкогольной нагрузке (как однократной, так и систематической интоксикации алкоголем), а высокий – напротив, обуславливал высокую переносимость алкоголя и объяснял отсроченное во времени (замедленно-прогрессивное) алкогольное поражение органов и систем [23,33].

Подобные закономерности проверены и подтверждены нами и в популяционных исследованиях в регионах Крайнего азиатского Севера (на Чукотке, в Якутии), проведенных с целью изучения: 1) особенностей протекания алкогольной болезни у представителей коренных этносов и пришлого населения и 2) связи этих особенностей с биохимической конституцией. Оказалось, что и чувствительность к алкогольной ситуации (толерантность к алкоголю – как исходная, до



Рис. 2. Зависимость типа течения алкогольной болезни от исходного, доболезненного, уровня активности ферментной системы ГТТ. Примечание. Жирной линией представлен высокопрогрессивный тип течения с высоким риском быстрого развития коморбидных осложнений систематической алкоголизации; тонкой – слабопрогрессивный алкоголизм, протекающий через этапы повышения механизмов общей резистентности под влиянием алкоголя как адаптогена и индуктора ГТТ с отсроченным периодом истощения системы ГТТ и развитием тканевой и гемической гистаминемии, обуславливающим характерный спектр коморбидности



Рис. 3. Пути и механизмы реализации роли гамма-глутамилтрансферазы в метаболических эффектах этилового алкоголя в связи с симптомами посталкогольной интоксикации и органо-патологии [28, 29]

Пояснение к схеме: схема раскрывает сложные взаимосвязи между элементами биохимических механизмов антагонистических (патогенных, с одной стороны, и адаптационных – с другой) эффектов употребления алкоголя. Механизм защитно-адаптационного характера (с заливкой) реализуется через увеличение активности ГТТ и стимулируемые этой ферментной системой процессы синтеза пептидов-регуляторов, поддержания гомеостаза универсального дезинтоксиканта глутатиона и химической инактивации почками высокотоксичного ацетальдегида. Механизм патогенного действия этилового алкоголя (без заливки) в организме и формирования симптомокомплекса алкогольной интоксикации складывается из: 1) смещения соотношения окисляющих и восстанавливающих эквивалентов (так называемого редокс-баланса); 2) превышения физиологического уровня гистамина в крови и тканях; 3) связывания свободного КоА и нарушения реакций цикла Кребса и метаболизма ненасыщенных жирных кислот; 4) запуска механизма проактиваторов воспаления, которые вторично повышают уровень гистаминами. Совокупность 1–4 обуславливает развитие симптомокомплекса посталкогольной интоксикации и органо-патологии

алкоголизации, так и индуцируемая последующим злоупотреблением алкоголем), и характер протекания болезни (темпы прогрессирования – прогрессивность, характер и степень тяжести развивающейся соматоневрологической патологии) определяются функциональной мощностью и свойствами индуцибельности ГТТ. В связи с этим были прослежены, по крайней мере, два разных типа течения алкоголизма (рис.2) у лиц с конституционально или ситуационно ослабленной или, напротив, мощной системой ГТТ [13, 26, 28, 30, 32]. На рис. 3 представлены механизмы реализации адаптогенных и патогенных эффектов этилового алкоголя с участием индуцибельной ферментной системы ГТТ.

Таким образом, по нашему предположению, ферментная система ГТТ может рассматривать-

ся не просто как участник в «челночных» транспортных процессах и поддержании внутриклеточных и тканевых пулов веществ, но и, в целом, как системный регулятор «региональных трофических контуров» (термин Г.Н. Крыжановского [3]) или ЕФТС [6,7] в соматических органах, мышечных волокнах, глиоцитах, других тканях. В поисках если не прямых доказательств, то дополнительных данных, свидетельствующих в пользу этого, нам потребовалось выйти за пределы наркологической клиники.

Литература

1. Бредбери М. Концепция гематоэнцефалического барьера / Пер. с англ. д.м.н. В.И. Кандрора. – М.: Медицина, 1983. – 480 с.
2. Вайсфельд И.Л., Кассиль Г.Н. Гистамин в биохимии и физиологии. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
3. Дизрегуляторная патология: руководство для врачей и биологов / Под ред. акад. РАМН Г.Н. Крыжановского. – М.: Медицина, 2002. – 632 с.
4. Ивашкин В.Т., Минасян Г.А., Уголев А.М. Теории функциональных блоков и проблемы клинической медицины. – Л.: Наука, 1990. – 330 с.
5. Казначеев В.П., Дзизинский А.А. О механизмах регуляции функции проницаемости капилляро-соединительнотканых структур // Структура и функция биологических мембран. – М., 1968. – С. 34–36.
6. Казначеев В.П., Дзизинский А.А. Клинические аспекты проблемы проницаемости капилляро-соединительнотканых структур // Структура и функция биологических мембран. – М., 1971. – С. 205–215.
7. Казначеев В.П., Субботин М.Я. Этюды к теории общей патологии. – Новосибирск: Наука, 1971. – 230 с.
8. Казначеев В.П., Казначеев С.В. Адаптация и конституция человека. – Новосибирск: Наука, 1986. – 121 с.
9. Клинические аспекты полярной медицины / Под ред. В.П. Казначеева. – М.: Медицина, 1986. – 208 с.
10. Коларов Стефан. Ревматизм в детском возрасте. – София: Медицина и физкультура, 1970. – 607 с.
11. Кржечковская В.В., Небольсин В.Е., Желтухина Г.А. и др. Биологическая роль γ -глутамирования белков аминами // Патогенез. – 2003. – №2. – С. 34–41.
12. Кржечковская В.В., Желтухина Г.А., Небольсин В.Е. и др. Изучение анафилактической активности и механизмов действия γ -L-глутамилгистамина // Патогенез. – 2003. – №2. – С. 67–71.
13. Лиопо А.В., Чернобровкина Т.В. Некоторые метаболические особенности коренного населения Чукотки // Актуальные вопросы патологии внутренних органов: науч. труды Новосибирского мед. института / Под ред. акад. РАМН Ю.П. Никитина. – Новосибирск, 1993. – С. 185–189.
14. Логинов В.А., Чернов Н.Н., Березов Т.Т. Гамма-глутамилтрансфераза: топография, механизмы

солюбилизации, изоформы, диагностическое значение (обзор) // Вопросы медицинской химии. – 1982. – Т. XXVIII, вып. 5. – С. 2–10.

15. Основы коррекции дизадаптивных расстройств у жителей Ханты-Мансийского автономного округа / Под ред. В.И. Хаснулина, В.Д. Вильгельма. – Новосибирск: СО РАМН, 1997. – 202 с.

16. Покалев Г.М. Гистогематический синдром, биологические мембраны в норме и патологии / Тез. докл. симпозиума 2–5 фев.1972. в Пущино-на-Оке, Моск.обл. – М., 1972. – С. 49–50.

17. Приваленко С.В. Состояние некоторых сторон обмена соединительной ткани и его фармакологическая коррекция при различных клинических формах псориаза: автореф. дис. ... к.м.н. – М., 1984. – 17 с.

18. Пятницкая И.Н., Чернобровкина Т.В., Горюшкин И.И. Энзимодиагностические критерии алкоголизма // Журнал невропатологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 1985. – №7. – С. 1051–1053.

19. Хаснулин В.И. Введение в полярную медицину. – Новосибирск: Наука, СО РАМН, 1998. – 337 с.

20. Чернобровкина Т.В. О роли гамма-глутамилтрансферазы в патогенезе алкоголизма // Социально-гигиенические исследования образа жизни и состояния здоровья населения: сборник науч. трудов / Под ред. член-корр. АМН СССР проф. Ю.П. Лисицына. – М.: 2-й МОЛГМИ им. Н.И. Пирогова, 1985. – С. 135–140.

21. Чернобровкина Т.В. Гамма-глутамилтрансфераза. Роль в патогенезе алкоголизма, наркоманий и токсикоманий // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Наркология. – 1989. – Т.3. – С. 1–200.

22. Чернобровкина Т.В. К вопросу о механизмах алкогольного поражения сердечно-сосудистой системы // Алкоголизм и неалкогольные токсикомании / Под ред. проф. И.Н.Пятницкой и к.м.н. Д.Д. Еникевой – М., 1985. – С.127–131.

23. Чернобровкина Т.В. Энзимопатии при алкоголизме. – Киев: Здоровье, 1992. – 312 с.

24. Чернобровкина Т.В. Ферментемии и физиолого-биохимическая адаптация при заболеваниях с химической зависимостью: дис. ... д.м.н. в форме научн. доклада. – М., 1996. – 77 с.

25. Чернобровкина Т.В. Возможные механизмы участия гамма-лутамилтрансферазы в индивидуальной чувствительности к алкоголю и алкогольно-индуцированной патологии // Материалы 4-й Международной конференции «Биологические основы индивидуальной чувствительности к психотропным средствам», 13–16 марта, 2006 г. – М.: ГУ НИИ им. Закусова РАМН, 2006. – С. 78–79.

26. Чернобровкина Т.В., Астахова Т.И. Особенности соматической патологии при алкогольной интоксикации в регионах Крайнего Севера // Актуальные вопросы профилактики пьянства и алкоголизма в условиях Сибири и Дальнего Востока: материалы региональной научн.-практич. конференции. – Томск: Томский НЦ Институт психического здоровья СО АМН СССР, 1986. – С. 130–134.

27. Чернобровкина Т.В., Кершенгольц Б.М., Алексеев В.Г. Биохимические методы диагностики алкоголизма // Лаб.дело. – 1986. – №9. – С. 523–525.

28. Чернобровкина Т.В., Кершенгольц Б.М. Фундаментальные и медико-социальные аспекты аддиктологии: крат. курс лекций в 2 томах. – Якутск – Москва: Изд-во «ООО Компания «Дани АлмаС», 2010 (т.1. – 474 с.) и 2011(т.2). – 524 с.

29. Чернобровкина Т.В., Ибрагимова М.В. Клиническая лабораторная диагностика медико-биологических последствий наркотизации у детей и подростков в условиях амбулаторного наблюдения: руководство для врачей наркологических диспансеров. – Харьков: Плеяда, 2010. – 148 с.

30. Чернобровкина Т.В., Лиопо А.В., Кершенгольц Б.М., Аркавий И.В. Биохимическая конституция как основа особенностей патоморфоза алкоголизма (органопатологии при алкоголизации) в регионах Севера // Социально-медицинские проблемы пьянства и алкоголизма в регионах проживания малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока: материалы 1-й науч.-практич. конференции (Архангельск, 29–30 мая 1992 г.). – Архангельск, 1992. – С. 90–96.

31. Braun J.P., Siest G., Rico A.G. Uses of γ -Glutamyltransferase in Experimental toxicology // Advances in veterinary science and comparative, vol.31. – Orlando e.a., 1987. – P. 151–172

32. Chernobrovkina T.V., Astachova T.I., Arkavy I.V. Alcohol consumption and risk factors of the ischemic heart disease in chukchee Inhabitants. Clinical, biochemical and population analysis // 8-th Intern. Congr. on circumpolar health in the North Community Health: problems and solutions. –Wighthors. Canada, May 20–25, 1990; Poster Abstr., 1990. – P.91.

33. Chernobrovkina T.V., Arkavy I.V. GGT-system regulation of the alcohol consumption is the one of the possible molecular mechanisms of alcoholism development // 15-th Int. Congr. of Biochemistry. – Jerusalem, Israel, August 4–8, 1991; Abstr., 1991. – P.84.

34. Granerus G., Svensson S.E., Wetterqvist H. Histamine in Alcoholic drinks // Lancet. – 1969. – V. 1. – P.1320.

35. Halsall S., Peters T.J. Effect of chronic ethanol consumption on the cellular and subcellular distribution of γ -glutamyltransferase in rat liver // Enzyme. –1984.– V. 31, №4.– P. 221–228.

36. Kera Y., Komura S., Kiriya T., Inoue K. Effects of γ -Glutamyltranspeptidase inhibitor and reduced glutathione on renal acetaldehyde levels in rats // Biochem. Pharmacol.–1985. – V. 34, №20.– P. 3781–3783.

37. Konishi Y., Kakimoto Y. Formation of γ -Glutamylhistamine from histamine in rat brain // J. of Neurochem. –1976. – V. 27, №6.– P. 1461–1463.

38. Kristenson H., Trell E., Fex G., Hood B. Serum γ -glutamyltransferase: statistical distribution in a middle-age male population and evaluation of Alcohol habits in individuals with elevated levels // Preventive medicine.– 1985. – V. 9, №1.– P.108–119.

39. Reyes E. Rat brain γ -glutamyltranspeptidase: effect of alcohol // Res. Commun. Chem. Pathol. and Pharmacol. – 1978. – V. 21, №1. – P. 145–148.

40. Reyes E., William R., Miller W. Serum γ -glutamyltranspeptidase as a diagnostic aid in problem drinkers // Addict Behav. – 1980. – V. 5, №1. – P. 59–65.

41. Tate S.S. and Meister A. Interaction of γ -glutamyltranspeptidase with amino acids, dipeptides, and derivatives and analog glutathione // J. Biol. Chem. – 1974. – V. 249. – P. 7593–7602.

42. Vali Pasha K., Vijayan E. Glutathion and gamma-glutamyltranspeptidase in the adult female rat brain after intraventricular injection of somatostatin // Biochem. Int. – 1990. – V. 21, №2. – P. 209–217.

43. Yoshinori I., Masahiro N., Rioso O., Kiyomi S. Changes in histamine metabolism in the mouse hypothalamus induced by acute administration of ethanol // J. Neurochem. – 1985. – V. 45, №6. – P. 1880–1885.

Поступила в редакцию 29.01.2015

УДК 577.57.017.32

Механизмы зимней спячки и холодоустойчивости зимоспящих беличьих Якутии

А.И. Ануфриев

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приведены материалы изучения механизмов зимней спячки беличьих Якутии в условиях естественного температурного фона. Рассмотрены три момента: ритмика зимней спячки и механизмы ее формирования; интенсивность метаболизма и механизмы ее регуляции; зимняя спячка беличьих Якутии с температурой тела ниже 0°C. У зимоспящих беличьих Якутии зимняя спячка состоит из сменяющих друг друга интервалов нормо- и гипотермии. В отличие от сородичей, обитающих в более теплом климате, период спячки продолжительнее, а максимальная длительность оцепенений выше. В состоянии гипотермии у бурундука обмен веществ снижается в 80–100 раз, у сусликов в 100–130, у сурка в 30–50 раз. Присутствует температурная зависимость метаболизма. У черношапочного сурка и двух видов сусликов минимальный уровень метаболизма в диапазоне околонулевых температур, у бурундука несколько выше. Черношапочный сурок, длиннохвостый и арктический суслики способны находиться в спячке с температурой тела ниже нуля, суслики – до –2°C, сурок – до –1°C.

Ключевые слова: зимняя спячка, суслики, сурки, бурундуки, терморегуляция, температура тела, ритмы спячки.

The report presents a study of hibernation mechanisms in Squiridae family in Yakutia in conditions of the natural temperature. The next three points are considered: the rhythm of winter hibernation and mechanisms of its forming; the intensity of metabolism and mechanisms of its regulation; winter hibernation of Squiridae in Yakutia with body temperature below zero degrees Celsius. A winter hibernation of winter-hibernating Squiridae of Yakutian consists of successive intervals of normothermia and hypothermia. Unlike the relative species living in warmer climate they have longer hibernating period and longer maximum length of the stupor duration. In a state of hypothermia, metabolism is reduced in 80–100 times in chipmunks, 100–130 times in gophers and 30–50 times in marmot. The temperature dependence of metabolism is present. The black-capped marmot and two gopher species have minimum metabolism level in the range of near zero temperatures. The chipmunk has it slightly higher. Black-capped marmot, Long-tailed and Arctic ground squirrels are capable to be in hibernation with a body temperature below zero, the ground squirrels – to 2 below zero and Black-capped marmot to 1 below zero degrees Celsius.

Key words: hibernation, gophers, groundhogs, chipmunks, thermal control, body temperature, hibernation rhythms.

В начале 80-х годов прошлого века в ИБПК СО РАН по инициативе д.б.н., проф. Н.Г. Со-

ломонова были организованы работы по изучению механизмов зимней спячки зимоспящих беличьих, обитающих в Якутии. К моменту начала исследований уже был накоплен определенный фактический материал об экологии и фи-

АНУФРИЕВ Андрей Иванович – д.б.н., г.н.с. ИБПК СО РАН, anufry@ibpc.ysn.ru

39. Reyes E. Rat brain γ -glutamyltranspeptidase: effect of alcohol // Res. Commun. Chem. Pathol. and Pharmacol. – 1978. – V. 21, №1. – P. 145–148.

40. Reyes E., William R., Miller W. Serum γ -glutamyltranspeptidase as a diagnostic aid in problem drinkers // Addict Behav. – 1980. – V. 5, №1. – P. 59–65.

41. Tate S.S. and Meister A. Interaction of γ -glutamyltranspeptidase with amino acids, dipeptides, and derivatives and analog glutathione // J. Biol. Chem. – 1974. – V. 249. – P. 7593–7602.

42. Vali Pasha K., Vijayan E. Glutathione and gamma-glutamyltranspeptidase in the adult female rat brain after intraventricular injection of somatostatin // Biochem. Int. – 1990. – V. 21, №2. – P. 209–217.

43. Yoshinori I., Masahiro N., Rioso O., Kiyomi S. Changes in histamine metabolism in the mouse hypothalamus induced by acute administration of ethanol // J. Neurochem. – 1985. – V. 45, №6. – P. 1880–1885.

Поступила в редакцию 29.01.2015

УДК 577.57.017.32

Механизмы зимней спячки и холодоустойчивости зимоспящих беличьих Якутии

А.И. Ануфриев

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Приведены материалы изучения механизмов зимней спячки беличьих Якутии в условиях естественного температурного фона. Рассмотрены три момента: ритмика зимней спячки и механизмы ее формирования; интенсивность метаболизма и механизмы ее регуляции; зимняя спячка беличьих Якутии с температурой тела ниже 0°C. У зимоспящих беличьих Якутии зимняя спячка состоит из сменяющих друг друга интервалов нормо- и гипотермии. В отличие от сородичей, обитающих в более теплом климате, период спячки продолжительнее, а максимальная длительность оцепенений выше. В состоянии гипотермии у бурундука обмен веществ снижается в 80–100 раз, у сусликов в 100–130, у сурка в 30–50 раз. Присутствует температурная зависимость метаболизма. У черношапочного сурка и двух видов сусликов минимальный уровень метаболизма в диапазоне околонулевых температур, у бурундука несколько выше. Черношапочный сурок, длиннохвостый и арктический суслики способны находиться в спячке с температурой тела ниже нуля, суслики – до –2°C, сурок – до –1°C.

Ключевые слова: зимняя спячка, суслики, сурки, бурундуки, терморегуляция, температура тела, ритмы спячки.

The report presents a study of hibernation mechanisms in Squiridae family in Yakutia in conditions of the natural temperature. The next three points are considered: the rhythm of winter hibernation and mechanisms of its forming; the intensity of metabolism and mechanisms of its regulation; winter hibernation of Squiridae in Yakutia with body temperature below zero degrees Celsius. A winter hibernation of winter-hibernating Squiridae of Yakutian consists of successive intervals of normothermia and hypothermia. Unlike the relative species living in warmer climate they have longer hibernating period and longer maximum length of the stupor duration. In a state of hypothermia, metabolism is reduced in 80-100 times in chipmunks, 100 - 130 times in gophers and 30-50 times in marmot. The temperature dependence of metabolism is present. The black-capped marmot and two gopher species have minimum metabolism level in the range of near zero temperatures. The chipmunk has it slightly higher. Black-capped marmot, Long-tailed and Arctic ground squirrels are capable to be in hibernation with a body temperature below zero, the ground squirrels - to 2 below zero and Black-capped marmot to 1 below zero degrees Celsius.

Key words: hibernation, gophers, groundhogs, chipmunks, thermal control, body temperature, hibernation rhythms.

В начале 80-х годов прошлого века в ИБПК СО РАН по инициативе д.б.н., проф. Н.Г. Со-

ломонова были организованы работы по изучению механизмов зимней спячки зимоспящих беличьих, обитающих в Якутии. К моменту начала исследований уже был накоплен определенный фактический материал об экологии и фи-

АНУФРИЕВ Андрей Иванович – д.б.н., г.н.с. ИБПК СО РАН, anufry@ibpc.ysn.ru

зиологии зимоспящих беличьих. Исследованиями специалистов института и кафедры зоологии СВФУ им. М.К. Аммосова были изучены основные эколого-физиологические характеристики видов. Было установлено, что численность зимоспящих беличьих имеет сезонную специфику, сроки залегания и выхода из спячки достаточно стабильны и приурочены к определенному режиму температуры среды. Численность бурундука и двух видов сусликов поддерживалась на высоком уровне благодаря использованию видами в питании продукции растениеводства и др. Определены основные экологические характеристики географических популяций видов: питание, размножение, использование территории. Исследован характер накопления жировых запасов, состав жира, обмен углеводов, изоферментный спектр ключевых ферментов [1–8]. Большинство вопросов, связанных с характеристикой зимней спячки видов, оставались не изученными. Не было известно, является спячка у беличьих Якутии процессом непрерывным или чередуется с периодическими пробуждениями, поскольку еще в середине 70-х годов известный специалист по зимней спячке животных Н.И. Калабухов предполагал, что у зимоспящих беличьих Севера спячка может быть процессом непрерывным [9–10]. Было не ясно, каким образом зимняя спячка беличьих Якутии проходит в условиях глубокого промерзания горизонтов почв, месторасположения зимовочных гнезд видов.

Основным направлением исследований было выявление механизмов, позволяющих зимоспящим беличьих Якутии зимовать в условиях непосредственной близости вечномерзлого грунта, когда большая часть периода зимней спячки проходит при температурах ниже точки замерзания воды. Соответственно был очерчен круг задач, способствовавших достижению цели. К ним относились: характеристика специфических видовых особенностей процесса перезимовки, выявление механизмов регуляции уровня метаболизма и температуры тела, особенностей формирования ритмов зимней спячки, продолжительности и соотношения частей спячки у разных видов, энергозатраты на части составляющие спячку, влияние флуктуаций факторов среды на ход и ритмику процесса.

В представленном сообщении приведены материалы изучения механизмов зимней спячки беличьих Якутии в условиях естественного температурного фона будут рассмотрены три ключевых момента: ритмика зимней спячки и механизмы ее формирования; интенсивность метаболизма и механизмы ее регуляции; зимняя спячка беличьих Якутии с температурой тела ниже 0°C.

Материал и методики исследований

Исследования проводились с использованием следующих методических подходов: об уровне метаболизма судили по потреблению кислорода, используя разработанный вариант методики исследования газообмена в открытой системе [11–12]. Ритмы зимней спячки и температуру тела животных исследовали при помощи непрерывной регистрации температуры тела при помощи имплантируемых в различные части тела, изначально, терморезисторов [13], затем с применением цифровых приборов [14]. Животных для исследований отлавливали в их естественных местообитаниях: длиннохвостых сусликов (*S. undulatus* Pallas, 1778) и сибирских бурундуков (*T. sibiricus jacutensis* Ognev, 1935) в окрестностях г. Якутска, черношапочных сурков (*M. camtschatica* Pallas, 1811) и арктических сусликов (*S. parryi* Richardsons, 1827) в Верхоянье. Экспериментальные исследования проводились в виварии ИБПК СО РАН в окрестностях г. Якутска.

Ритмика зимней спячки и механизмы ее формирования

Зимняя спячка грызунов включает два основных компонента: продолжительные оцепенения со значительным снижением метаболизма и температуры тела и относительно короткие периоды гомойотермного состояния. При периодических пробуждениях животные могут либо принимать пищу (хомяки и бурундуки), либо вообще обходиться без нее (суслики и сурки). У них выводятся из организма только жидкие экскременты или жидкие, и твердые. Существует ряд гипотез, с определенной долей вероятности объясняющих прерывистость спячки, тем не менее, природа, роль и соотношение эндогенных и экзогенных факторов в формировании ритмов зимней спячки окончательно не определены [15]. С переходом зимоспящих животных к норной жизни и потерей связи с поверхностью почвы количество воздействующих на них внешних факторов, синхронизирующих эндогенные ритмы с экзогенными, значительно снижается. Исчезает периодизм освещенности, температуры и влажности воздуха. Основными факторами, позволяющими синхронизировать эндогенные ритмы с сезонными изменениями внешней среды, по крайней мере, для зимоспящих грызунов северо-востока Сибири, остаются лишь температура, и, в меньшей степени, атмосферное давление и влажность почвы. Отсутствие внешних синхронизаторов вызывает изменения в организации суточных ритмов. Животные переходят на свободно текущие суточные ритмы сна – бодрствования [16].

В естественной среде переход зимоспящих беличьих Якутии к норной жизни, а затем к спячке происходит обычно после выпадения снега и установления отрицательных суточных температур. У сибирского бурундука и длиннохвостого суслика в Центральной Якутии этот период приходится обычно на первую половину октября, но в пределах ареалов видов эти сроки колеблются на 2–4 недели.

По нашим наблюдениям, бурундуки переходят к норной жизни несколько раньше, чем длиннохвостые суслики на общей территории обитания. Арктический (берингийский) суслик и черношапочный сурок, обитающие в более суровых климатических условиях горной тундры, уходят с поверхности почвы в более ранние сроки: в конце сентября – начале октября. В теплую осень длиннохвостый суслик не теряет связи с поверхностью почвы до конца октября, а отдельные выходы их из нор зарегистрированы нами в первой половине ноября. Процесс перехода зимоспящих животных от гомойотермии к гетеротермии и гипотермии продолжителен во времени и сопровождается короткими многократными понижениями температуры тела и уровня метаболизма. У длиннохвостого, арктического сусликов и черношапочного сурка в эксперименте первые случаи гипотермии отмечены в начале октября, у бурундуков – в начале ноября. Периоды гипотермии постепенно нарастают, достигая максимума в феврале–марте, затем их продолжительность уменьшалась (рис. 1–4). Существуют видовые особенности протекания зимней спячки, состоящие в разной продолжительности интервалов гипотермии и в сро-

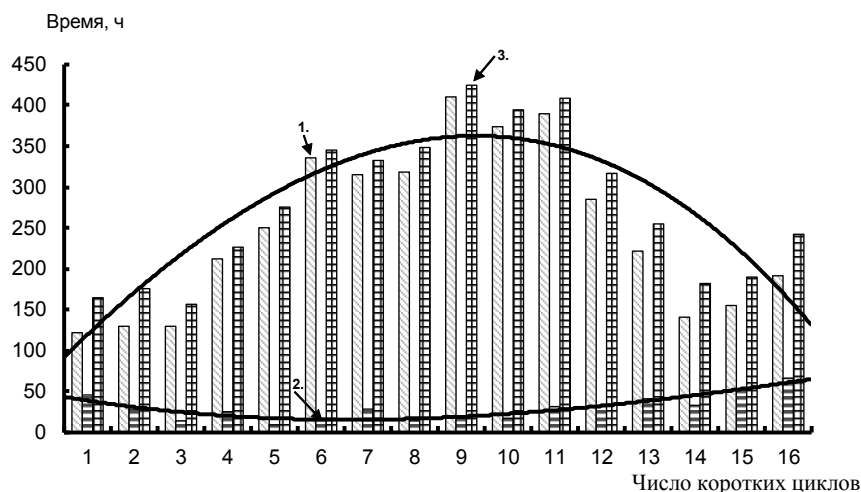


Рис. 1. Периодичность оценок и пробуждений у длиннохвостого суслика в период спячки (4670 ч) с 7 октября по 25 апреля. 1 – гипотермия; 2 – гетеротермия; 3 – продолжительность короткого цикла (гипотермия+гетеротермия)

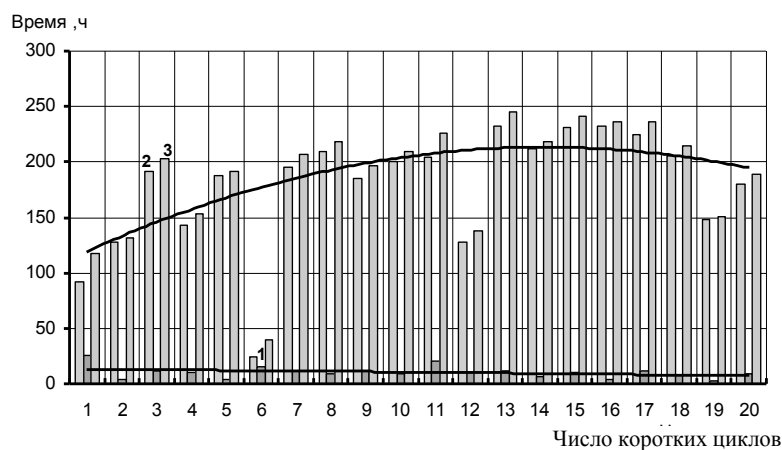


Рис. 2. Число и продолжительность коротких циклов спячки у бурундука во время зимовки с 21 ноября по 20 апреля: 1 – гипотермия; 2 – нормотермия; 3 – продолжительность короткого цикла

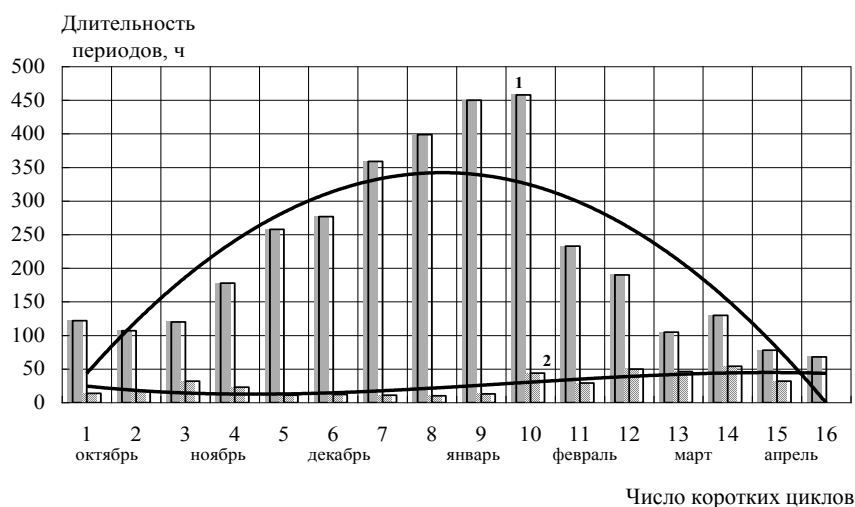


Рис. 3. Периодичность оценок и пробуждений у черношапочного сурка на протяжении периода зимней спячки (4375 ч) с 12 октября по 12 апреля: 1 – гипотермия; 2 – пробуждения

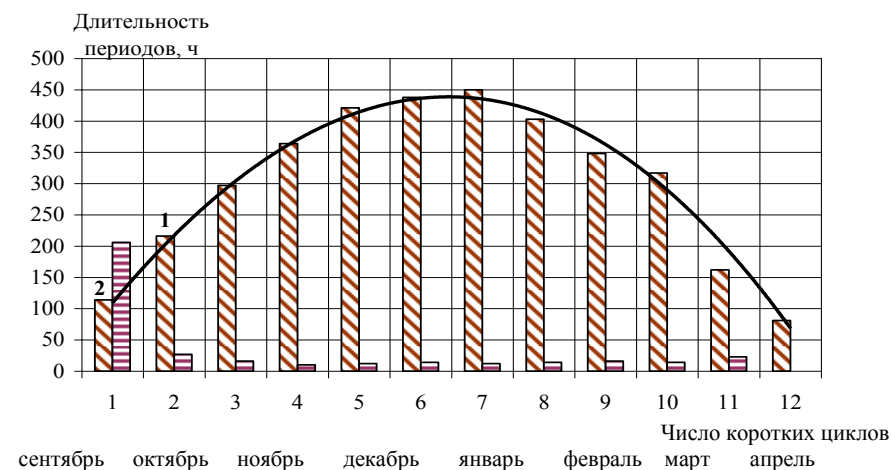


Рис. 4. Периодичность оцепенений и пробуждений у арктического суслика на протяжении зимней спячки: 1 – оцепенения; 2 – пробуждения

ках наступления спячки. Первые периоды понижения температуры тела кратковременны и были чаще приурочены к ночному времени суток. Затем длительности гипотермии постепенно увеличивались, животные прекращали принимать пищу, при пробуждениях выводили только жидкие экскременты. После двух–трех первых коротких периодов оцепенения зверьки приобретали способность находиться в гипотермии с температурой тела, незначительно превышающей температуру среды в положительной области значений. При отрицательных температурах среды градиент температур «тело–среда» постепенно возрастал.

У бурундука, в отличие от сусликов и сурков, процесс впадения в спячку более растянут во времени. На протяжении первой половины зимы они периодически впадали в гипотермию, чередуя непродолжительные оцепенения с периодами (3–5 сут) нормотермии. Глубокая спячка у бурундуков чаще начиналась с конца декабря, а у некоторых даже с января (рис. 2). После окончания спячки в конце марта – начале апреля, при переводе животных в помещение с естественным световым днем, суточные ритмы восстанавливались. Анализ продолжительностей временных составляющих спячки у животных разных видов семейства беличьих показал (табл. 1),

что максимальная продолжительность гипотермии в зоне оптимальных температур у арктического суслика составляла 453 ч (18,86 сут), у длиннохвостого – 412 ч (17,16 сут), у сибирского бурундука – 229 ч (9,54 сут) [12, 17].

У черношапочного сурка периоды гипотермии были еще продолжительнее 20,5–22 сут. Наибольшая продолжительность периодов гипотермии у сурка была отмечена в феврале–марте при температурах среды $-2...-3^{\circ}\text{C}$. У взрослой самки до 16,5, у годовалого самца 17, у сеголетков до 22 сут [18–19]. Отметим, что у европейских (аль-

пийских) сурков (*M. marmota*) максимальная продолжительность гипотермии на протяжении зимовки не превышает 19 сут, а у европейского суслика

(*S. citellus*) не более 14 сут [20–21]. У черношапочного сурка продолжительность залегания в спячку после спонтанного пробуждения происходит в течение суток (с температурой тела $32-36^{\circ}\text{C}$ до $1-2^{\circ}\text{C}$), пробуждение 4–6 ч, причем у более мелких зверьков и время пробуждения и время впадения в спячку значительно короче [22]. Зависимость продолжительности гипотермии от величины и массы животных, даже в пределах одного вида, отмечалась ранее [23–24].

Продолжительности гомойотермных периодов у каждого вида на протяжении зимы были относительно постоянными. У арктического и длиннохвостого сусликов отсутствовали достоверные различия по этому показателю. У бурундуков, уступающих по размерам и массе тела сусликам, длительности частей пробуждения были заметно короче. Максимальная продолжительность гипотермии у зимоспящих животных была тем выше, чем больше масса и размеры тела. Наблюдения за спячкой 14 особей трех видов беличьих на протяжении 3 тыс. ч показали, что время их пребывания в гипотермии

Таблица 1

Средняя продолжительность основных компонентов спячки

Вид	Фаза процесса, ч			
	разогревание	нормотермия	залегание	гипотермия
Бурундук	$3,22 \pm 0,13(36^*)$	$11,45 \pm 0,46(36)$	$5,25 \pm 0,21(36)$	$135,83 \pm 9,47(36)$
Длиннохвостый суслик	$4,9 \pm 0,08(79)$	$14,65 \pm 1,48(79)$	$10,56 \pm 0,29(79)$	$235,5 \pm 11,58(79)$
Арктический суслик	$4,9 \pm 0,17(22)$	$15,26 \pm 1,8(22)$	$9,8 \pm 0,49(22)$	$265,24 \pm 26,03(22)$

* Число измерений.

Таблица 2

Продолжительности компонентов спячки у 3 видов беличьих на протяжении 3 тыс. ч наблюдений

Показатель	Вид		
	бурундук	арктический суслик	долгохвостый суслик
Продолжительность гипотермии за спячку, ч	2278,33±142,75 (3*)	2252,0±231,59 (3)	2389,56±55,39 (8)
Продолжительность гетеротермии за спячку, ч	142,83 ± 11,83 (3)	95,5±11,18(3)	140,56±21,69(8)
Макс. продолжительность гипотермии, ч	212,33 ± 23,8 (3)	430,0±18,5(3)	392,7±13,17(8)
Макс. продолжительность гетеротермии, ч	18,0 ± 1,25 (3)	53,5±23,92(3)	29,25±9,29(8)
Гипотермия, %	94,2	95,04	94,5
Гетеротермия, %	5,8	4,96	5,5

* Число животных.

Таблица 3

Характеристика ритмов зимней спячки у черношапочных сурков

Показатель	Самец 1		Самец 2		Самка	
	гипотермия	пробуждение	гипотермия	пробуждение	гипотермия	пробуждение
Средняя продолжительность спячки, ч	220,75±33,25	26,53±4,06	185,6±25,22	18,4±2,34	215,12±29,81	19,6±2,77
Min-Max, ч	68–458	10–54	39–447	8–48	32–439	7–44
Число периодов, шт.	16	15	20	19	17	16
Общая продолжительность, ч	3532	398	3712	350	3657	294
Общая продолжительность, %	89,87	10,12	91,38	8,61	92,55	7,44

составляет 94–95%. Бурундуки пробуждались чаще сусликов, но продолжительность пробуждений у них заметно короче, и, в конечном итоге, общее время нахождения в гипотермии у бурундуков и сусликов в период глубокой спячки оказалось близким по абсолютной величине (табл. 2, [15]).

У черношапочных сурков продолжительность периодов нормотермии была несколько выше, чем у сусликов и бурундука (табл.3, рис.3). Это связано с более крупными размерами и массой тела сурков, поскольку разогревание и остывание у животных большей массы занимают больше времени.

На основании изложенных выше материалов о ритмике периодов гипо- и нормотермии нами выделены общие и видовые особенности ритмов зимней спячки у северных видов зимоспящих. У зимоспящих беличьих Якутии, как и у зимоспящих беличьих более низких широт, зимняя спячка состоит из периодически повторяющихся и сменяющих друг друга интервалов нормо- и гипотермии. Всю спячку условно можно разделить на три части:

1) залегание, состоящее из нескольких коротких периодов гипотермии, сопровождающихся постепенным снижением уровня метаболизма и возрастанием продолжительности оцепенений;

2) период глубокой спячки, характеризующийся минимальным уровнем метаболизма, максимальной продолжительностью периодов оцепенения;

3) окончание спячки, сопровождающееся уменьшением периодов гипотермии и возрастанием уровня метаболизма.

Интенсивность метаболизма и механизмы ее регуляции

Механизмы метаболического подавления во время гибернации мало изучены. Во время входа или выхода из гибернации изменениям температуры тела предшествуют изменения в потреблении кислорода, сердечных, дыхательных ритмов и церебрального кровотока. Все это доказывает активную регуляцию метаболизма, несмотря на влияние температуры [25–27], и подтверждает гипотезу, что парасимпатическое равновесие контролирует вхождение в спячку и ее протекание, а сдвиг равновесия провоцирует пробуждение [28–30]. Уровень метаболизма у животных в состоянии оцепенения понижается до $1/10 \div 1/100$ уровня у активных зверьков [31–32]. Во время гибернации арктических сусликов потребление кислорода сокращается от 1,0 до 0,01 млО₂ / г·ч [26,33].

Период зимней спячки у беличьих Якутии составляет от 180 до 200 сут. На протяжении спячки происходит снижение массы животных с постепенным нарастанием уровня метаболизма. В табл. 4 приведены материалы об уровне потребления кислорода и изменении массы тела у отдельного суслика (взрослая самка) в разные месяцы перезимовки. В начале спячки уровень обмена снижается, затем начинается его рост. За пять месяцев наблюдений животное потеряло

Потребление кислорода у длиннохвостого суслика в разные периоды зимней спячки при -2°C

Показатель	Период наблюдения				
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
Потребление кислорода, мл/г·ч	$0,128 \pm 0,01(7^*)$	$0,067 \pm 0,007(6)$	$0,07 \pm 0,003(6)$	$0,081 \pm 0,001(5)$	$0,087 \pm 0,003(3)$
Потребление кислорода, мл/жив.ч	0,093	0,045	0,045	0,048	0,049
Масса животного, г	727	673	618	596	567
Температура тела, $^{\circ}\text{C}$	3,6	2,8	2,3	2,4	1,6

* Число измерений.

22% от стартовой массы, относительный уровень потребления кислорода возрос на 28%. С потерей массы тела у животных относительный уровень обмена веществ изменяется сильнее, чем абсолютный.

Исследована температурная зависимость метаболизма находящихся в состоянии гипотермии двух видов сусликов, черношапочного сурка и сибирского бурундука. У всех исследованных зимоспящих беличьих определена зависимость уровня метаболизма от температуры окружающей среды [12, 15–17, 34–38].

При изменении температуры в положительную или отрицательную сторону животные реагировали в течение 5–10 мин. При изменении температуры от 0 до 5° и от 0 до -5° заметно увеличивалась частота дыхания, возрастало потребление кислорода (рис.5), но пробуждений отмечено не было. При температурах внешней среды -5° , -4° , -3° , -2° , -1° , 0° , 2° , 4° , 6° , 8° потребление кислорода у длиннохвостого суслика было ниже, чем у зверьков в летнее время, соответственно, в 8,3; 11,3; 20; 30; 44,7; 131,7; 72,1; 34,7; 12,8; 3,7 раза. Минимальный уровень обмена у длиннохвостого суслика в состоянии оцепенения отмечен при температурах, близких к околонулевым значениям – $0,0137 \pm 0,0012$ мл $\text{O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$. При таком уровне метаболизма частота сердечных сокращений не превышала 2–4 ударов в минуту. У длиннохвостого суслика в гипотермии происходила активная регуляция уровня метаболизма в зависимости от темпера-

туры окружающей среды. При температурах среды от -2 до $3-4^{\circ}\text{C}$ изменения уровня потребления кислорода незначительны (минимальный обмен), вне данного интервала интенсивность метаболизма увеличивалась. У арктического суслика выявлена сходная зависимость уровня метаболизма от температуры окружающей среды (рис.6). Минимальный обмен составлял $0,0157 \pm 0,001$ мл $\text{O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$ при температурах, близких к 0° , при изменении температуры в положительную либо отрицательную сторону потребление кислорода возрастало. У черношапочного сурка исследована температурная зависимость потребления кислорода в диапазоне температур от -3 до 6°C . Минимальный обмен зарегистрирован при температурах, близких к 0° , составлял в среднем $0,024 \pm 0,004$ мл $\text{O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$. При снижении или повышении температуры внешней среды также отмечен рост уровня потребления кислорода (рис.7). Проведено изучение температурной зависимости уровня метаболизма у гибернирующих бурундуков массой от 70 до 100 г. Прослежена динамика потребления кислорода в интервале температур от -6 до 10°C . Минимальное потребление кислорода, отмеченное при $3-5^{\circ}$, составляло $0,042 \pm 0,0017$ мл $\text{O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$. Снижение внешних температур вызывало резкий, почти линейный рост потребления кислорода. При -5°C потребление кислорода возрастало в 5 раз по сравнению с минимальным уровнем. При повышении температуры отмечен более плавный рост уровня метаболизма (рис.8).

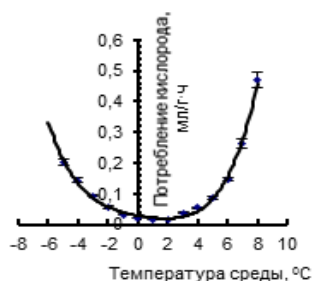


Рис. 5. Температурная регуляция метаболизма у длиннохвостого суслика в период зимней спячки

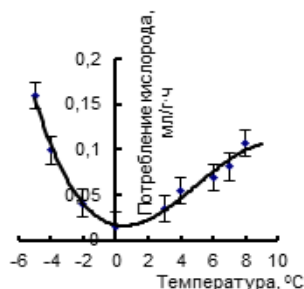


Рис. 6. Температурная регуляция метаболизма у арктического суслика в период зимней спячки

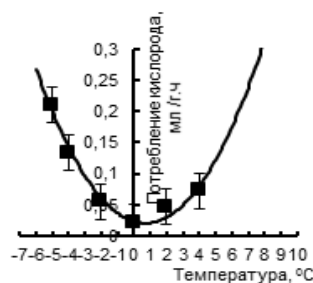


Рис. 7. Температурная зависимость регуляции уровня метаболизма у черношапочного сурка в спячке

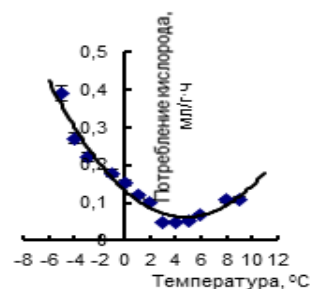


Рис. 8. Температурная зависимость регуляции уровня метаболизма у сибирского бурундука в спячке

Характер зависимости потребления кислорода от температуры среды у зимоспящих беличьих указывает на активную регуляцию уровня метаболизма и температуры тела в состоянии гипотермии. Для всех четырех зимоспящих видов беличьих северо-востока Сибири минимальный уровень обмена зарегистрирован в диапазоне температур от -1 до 5°C . При повышении или снижении температуры увеличивались энергозатраты на поддержание температуры тела. Если сравнивать относительные показатели минимального обмена, то на единицу массы тела меньше всех потребление кислорода у сусликов. Сравнение снижения уровня потребления кислорода в спячке по сравнению с активным состоянием у разных зимоспящих видов беличьих дает следующую картину: у бурндука обмен веществ снижается в 80–100 раз, у сусликов в 100–130, у сурка в 30–50 раз. Чем ниже масса тела, тем выше должен быть относительный уровень метаболизма. Но у сусликов уровень обмена оказался ниже, чем у остальных видов. Возможно, с этим связана способность сусликов находиться в спячке с отрицательной температурой периферических частей тела.

Зимняя спячка беличьих Якутии с температурой тела ниже 0°C

До последнего времени было известно, что среди млекопитающих лишь представители двух зимоспящих видов беличьих способны находиться в состоянии гипотермии с температурой тела ниже 0°C . Это длиннохвостый (*S. undulatus* Pallas, 1778) и берингийский (арктический) (*S. parryi* Richardson, 1827) суслики. Зимняя спячка длиннохвостого суслика с температурой тела ниже нуля отмечена в ряде публикаций [15, 35, 36, 39–43]. Имеются наблюдения о спячке арктического суслика с температурой тела ниже нуля [33, 44–46]. Лишь совсем недавно было установлено, что и черношапочный сурок (*Marmota camchatica* Pallas, 1811) на северо-востоке Сибири, в Якутии, во время зимней

спячки в периоды гипотермии способен поддерживать метаболизм при температурах тела около и даже ниже 0°C [17, 47].

Перед началом зимней спячки у сурков, как и у других видов зимоспящих беличьих, происходит ряд изменений в экологии и поведении, внешним проявлением которых являются: изменение ритмов суточной активности – снижается локомоторная деятельность; уменьшается, а затем прекращается прием пищи; зверьки достигают максимальной годовой массы; возрастает абсолютная и относительная продолжительность сна; понижается температура тела, снижается предпочитаемая температура среды [16]. Черношапочные сурки в естественных условиях в период зимовки до 250–270 сут проводят в норе, переходят к норной жизни во второй половине сентября, выходят на поверхность почвы со второй половины мая [48]. В течение августа–сентября среднесуточная температура тела сурков постепенно понижается (табл. 5). Первые сильные понижения температуры тела отмечены в конце сентября. Температура тела снижалась до $32\text{--}34^{\circ}$. В первой половине октября в ночные часы температура тела доходила до 13° на фоне резкого снижения среднесуточной температуры тела (табл. 6). Этот период, с конца сентября до середины октября, в сущности, уже является началом зимней спячки. Зверьки становятся малоподвижными, большую часть суток проводят в состоянии сна, в позе свернувшись «калачиком»: голова прижата к задним лапам, а хвост закрывает голову. Начало спячки характеризовалось относительно кратковременными постепенно нарастающими понижениями температуры тела. «Глубокая» спячка с продолжительными (до 6–8 сут) периодами гипотермии наступала в начале ноября.

Усредненная температура тела одного из сурков на протяжении сезона зимней спячки изменялась так: сентябрь ($35,30 \pm 0,067^{\circ}\text{C}$), октябрь ($27,85 \pm 0,35^{\circ}\text{C}$), ноябрь ($10,14 \pm 0,32^{\circ}\text{C}$), декабрь ($6,80 \pm 0,29^{\circ}\text{C}$), январь ($3,72 \pm 0,28^{\circ}\text{C}$), февраль ($2,37 \pm 0,25^{\circ}\text{C}$), март ($7,93 \pm 0,43^{\circ}\text{C}$), апрель

Таблица 5

Среднесуточная температура тела у представителей трех видов беличьих перед наступлением сезона зимней спячки

Вид/период		Август			Сентябрь		
		5	15	25	5	15	25
Арктический суслик	$M \pm m$	$37,23 \pm 0,23^*$	$37,0 \pm 0,10$	$36,92 \pm 0,15$	$35,85 \pm 0,18$	$35,56 \pm 0,21$	$34,83 \pm 0,27$
	Min–Max	35,5–39,0	36,0–38,0	36,0–38,0	34,0–37,0	34,0–37,5	30,5–36,5
Длиннохвостый суслик	$M \pm m$	-	-	$38,08 \pm 0,060$	$36,75 \pm 0,095$	$36,27 \pm 0,13$	$35,97 \pm 0,23$
	Min–Max	-	-	37,5–38,5	36,0–37,5	34,5–37,5	34,0–37,5
Черношапочный сурок	$M \pm m$	$36,71 \pm 0,19$	$35,96 \pm 0,22$	$36,33 \pm 0,19$	$35,85 \pm 0,19$	$35,29 \pm 0,23$	$33,77 \pm 0,47$
	Min–Max	35,5–38,5	34,5–38,0	35,0–38,0	34,0–37,5	32,5–36,5	27,5–36,0

* 24 измерения в сутки.

(21,89±0,53)°C. У второго сурка температура тела изменялась сходным образом. Наиболее низкие температуры тела в первый год наблюдений, до 0°C, отмечены у крупного самца 1 с января по март. У самца 2 температура тела опускалась до 0,5°C. При периодических пробуждениях температура тела животных поднималась до 35–36°C, пробуждения занимали относительно непродолжительное время. Вполне возможно, что периферические части тела у черношапочных сурков (под кожей и конечности) имели температуру ниже нуля, в периоды, когда температура в полости тела опускалась до нулевых значений. При наблюдении за температурой тела сурка 2 в зимний период 2011/12 г. установлено, что при снижении температуры среды ниже –8°C температура тела понижалась до значений ниже 0°C. В течение четырех месяцев температура сурка в периоды гипотермии имела отрицательные значения, минимальные до –1°C отмечены в периоды с наиболее низкими температурами среды (январь–февраль). В декабре и марте минимальные температуры были –0,5°C. При этом отмечено изменение ритма спячки сурка по сравнению с предыдущим годом. Это выражалось в уменьшении продолжительности периодов гипотермии в спячке при температурах ниже –8°C.

Арктический суслик в Якутии не имеет глубоких и теплых убежищ, углубленность нор до 80–100 см, и зимняя спячка, почти на всем ее протяжении, проходит при температурах среды ниже 0°C. Начало зимней спячки млекопитающих обычно связывают с их исчезновением из природных биотопов [32]. Но время начала залегания животных в спячку с понижением температуры тела в естественной среде определить невозможно. Так, арктический суслик в природных биотопах в Верхоянье исчезает в начале октября. Экспериментальные наблюдения показывают, что с середины октября температура тела зверьков периодически понижается до 25–30°C на фоне плавного снижения среднесуточной температуры тела. Отметим, что общее снижение температуры тела арктических сусликов начинается уже в августе. За полтора месяца, предшествующих спячке, среднесуточная температура тела зверьков понижалась на 2–3°C, возрастал диапазон ее суточных изменений (табл.5).

Среднесуточная температура тела у одного из арктических сусликов на протяжении сезона зимней спячки изменялась так: сентябрь 720(35,6±0,04)°C; октябрь 744(23,4±0,53)°C; ноябрь

720(5,3±0,34)°C; декабрь 744(1,94±0,25)°C; январь 744(–0,08±0,18)°C; февраль 670(0,89±0,30)°C; март 744(4,47±0,44)°C; апрель 161(23,01±1,64)°C. У суслика 1 минимальная температура тела в ноябре была 0°C, в декабре –0,5°C, в январе, феврале, марте до –2°C, в апреле, перед окончанием спячки –0,5°C. У 2 суслика температура тела ниже нуля также была отмечена с декабря по апрель (табл.6). У суслика 1 периоды гипотермии уже явно различались в середине–конце сентября. Этот зверек залег в спячку на 8–10 сут раньше. В период спячки температура тела у него была ниже, а продолжительность периодов с пониженной температурой больше. С приближением весны у обоих сусликов при пробуждениях температура тела стала подниматься до 37,5–38,0 °C, в то время как в период, который мы называем «глубокая спячка», это декабрь–март, во время спонтанных пробуждений зверьки разогревались в основном до 36,5°C. При низких положительных температурах среды, в начальный период спячки, градиент температур «среда–животное» составлял менее 1°C. С понижением температуры среды до отрицательных значений, –1...–3°C, температура тела зверьков снижалась до околонулевых значений. При температурах окружающей среды –4...–5°C температура тела животных на протяжении периодов гипотермии была –1,0...–1,5°C, при более низких температурах среды понижалась до –1,5...–2°C.

На протяжении периода оцепенения температура тела изменялась так: после очередного спонтанного пробуждения температура тела зверька монотонно, на протяжении 20–24 ч снижалась, достигала отрицательных значений и поддерживалась на таком уровне до следующего пробуждения. Длительность разогревания зверьков во время пробуждений в основном не превышала 4–6 ч, за этот период температура тела зверьков с –2°C, повышалась до 35–37°C. Процесс вхождения в спячку, снижение температуры тела, составлял 16–24 ч. Отметим, что в наших наблюдениях температура тела гибернирующего суслика не опускалась ниже –2°C, даже при температурах среды –8,5°C [46]. При наблюдении за североамериканским подвидом арктического суслика (*S. parryi kennicottii*) внутри брюшной полости была зарегистрирована температура –2,9° [45]. У этого же подвида арктического суслика, как позднее показали К. Бук и Б. Барнес [33], в брюшной полости при температурах среды –8°C, температура тела не понижалась ниже –1°C, при температуре среды –16°C намечалась тенденция к росту температуры тела.

Изменения температуры тела у длиннохвостого суслика 1 на протяжении периода спячки

* n(M± m); n – число измерений.

Таблица 6

Среднесуточная температура тела у трех видов зимоспящих белчих на протяжении периода зимней спячки

Период/особь		Суслик арктический		Суслик длиннохвостый		Сурок черношапочный		
						2010/11 г.		2011/12 г.
		1	2	1	2	1 ♂	2 ♂	2 ♂
Сентябрь	n*	720	720	313	652	330	330	722
	$M \pm m$	35,61±0,04	36,6±10,036	36,91±0,058	36,36±0,044	35,30±0,067	36,12 ±0,058	34,89±0,058
	Min–Max	29,0 – 38,0	33,5 – 38,5	34,13 – 38,75	32,5 – 38,5	32,0 – 37,5	32,5 – 38,0	22,5 – 37,5
Октябрь	n	744	744	496	744	744	744	744
	$M \pm m$	23,39±0,53	28,01±0,48	29,35±0,058	34,18±0,14	27,85±0,35	34,75± 0,093	22,41–0,42
	Min–Max	2,5 – 38,0	2,0 – 38,0	1,5 – 39,38	22,0 – 38,5	7,5 – 36,5	21,5 – 38,0	6,5 – 37,5
Ноябрь	n	720	720	480	720	720	720	720
	$M \pm m$	5,26±0,34	23,50±0,57	3,83±0,40	23,83±0,41	10,14±0,32	16,74 ±0,36	7,30±0,28
	Min–Max	0,0–38,0	2,0 – 38,5	–0,31 – 35,5	7,5 – 36,5	4,0 – 36,0	8,0 – 37,0	1,0 – 35,0
Декабрь	n	744	744	496	744	744	744	744
	$M \pm m$	1,94±0,25	4,68±0,35	1,31±0,30	23,81±0,42	6,80±0,29	10,92 ±0,29	3,39±0,28
	Min–Max	–0,5 – 36,5	–0,5 – 36,5	–1,06 – 35,81	8,5 – 36,5	1,0 – 35,5	4,5 – 36,5	–0,5 – 35,0
Январь	n	744	744	496	744	744	744	744
	$M \pm m$	–0,08±0,18	2,38±0,29	0,17±0,31	18,39±0,46	3,72± 0,28	5,43 ±0,27	2,028±0,27
	Min–Max	–2,0 – 36,5	–0,5 – 36,5	–2,06 – 36,0	7,5 – 36,5	0,0 – 36,0	1,0 – 36,0	–1,0 – 35,0
Февраль	n	672	672	464	672	672	672	696
	$M \pm m$	0,89±0,30	1,37±0,27	0,38±0,30	3,13±0,28	2,37± 0,25	3,92 ±0,31	1,94±0,28
	Min–Max	–2,0 – 37,0	–1,5 – 36,5	–2,0 – 35,69	0,0 – 36,5	0,0 – 35,0	0,5 – 35,5	–1,0–35,0
Март	n	744	744	496	744	744	744	744
	$M \pm m$	4,48±0,44	0,97±0,25	0,72±0,31	1,90±0,26	7,93± 0,43	5,30± 0,33	2,92±0,30
	Min–Max	–2,0 – 37,5	–1,5 – 36,5	–1,62 – 36,06	–0,5 – 36,5	0,0–35,0	1,0 – 35,5	–0,5 – 35,5
Апрель	n	720	720	480	720	720	720	720
	$M \pm m$	23,01±1,16	9,19±1,18	11,83±0,77	31,76±0,74	21,89± 0,53	20,10± 0,55	12,81±0,55
	Min–Max	–0,5 – 38,0	–0,5–38,0	–1,06–38,88	0,5 – 39,0	3,0 – 39,0	4,0 – 39,0	0,5 – 38,5
Май	n	–	–	362	744	744	744	567
	$M \pm m$	–	–	37,60±0,041	37,89±0,03	36,40±0,038	37,40±0,035	36,47±0,023
	Min–Max	–	–	35,63 – 39,38	35,5 – 40,5	33,0 – 38,5	35,0 – 39,5	34,5 – 38,0

n – число измерений.

и перед ее наступлением сходны с таковыми у арктического суслика и у черношапочного сурка (табл. 5–6). Периоды оцепенения в начале зимы непродолжительны, в декабре–январе они достигают максимальной продолжительности и поддерживаются на таком уровне до середины марта, затем длительность оцепенений постепенно сокращается. В начале апреля животные переходят к гомойотермии, в сроки, совпадающие с выходом зверьков из спячки в природе. Температура тела сусликов на протяжении всего процесса изменялась в соответствии с изменениями температуры окружающей среды. При температурах среды –3...–5°C температура тела длиннохвостых сусликов в межлопаточной области под кожей, а также внутри брюшины на протяжении периодов гипотермии понижалась до значений ниже 0°C, минимальная была не ниже –2°C. У длиннохвостых сусликов максимальная длительность оцепенений была немногим меньше, чем у арктических [15].

У второго длиннохвостого суслика до середины января спячка проходила в условиях

окружающих температур 4–6°C, затем температуру понизили до –2...–4°C. Спячка грызуна при относительно высоких положительных температурах среды характеризовалась высокой температурой тела и частыми спонтанными пробуждениями. При снижении температуры внешней среды до минусовых величин температура тела понизилась до значений ниже 0°C, а продолжительность периодов гипотермии возросла с 1–3 до 12–14 сут. Следовательно, пониженные температуры среды с более низкой температурой тела, до определенного предела, способствуют росту продолжительности оцепенений, что в свою очередь сокращает энергозатраты в спячке. И в ранних исследованиях [35–36], и в материалах, приведенных в данном сообщении, температура тела длиннохвостого суслика в состоянии гипотермии не опускалась ниже –2°C.

Спячка черношапочного сурка, арктического и длиннохвостого сусликов с температурой тела ниже 0°C является естественной адаптацией животных к условиям среды в период перезимовки, что позволяет видам выживать в окру-

жении глубоко промерзающих почв. Способность черношапочных сурков, арктических и длиннохвостых сусликов поддерживать метаболизм при отрицательных температурах тела, возможно, является важнейшим фактором успешности зимовки видов в условиях низких отрицательных окружающих температур.

Литература

1. Ларионов П.Д. Экологические наблюдения над якутским длиннохвостым сусликом // Зоол. журн. – 1943. – Т.22, вып. 2. – С. 234–246.
2. Ларионов П.Д. Мелкие грызуны Мегино-Кангаласского района и их стадияльное распределение // Уч. записки ЯГУ. – 1954, вып. 3. – С. 69–92.
3. Лабутин Ю.В., Соломонов Н.Г. Плодовитость в некоторых популяциях длиннохвостого суслика Якутии // Уч. записки ЯГУ. – 1967. – Вып. 17. – С. 54–58.
4. Винокуров В.Н. Опыт изучения некоторых эколого-морфологических особенностей длиннохвостых сусликов Якутии: дис. ...к.б.н. – Томск, 1970. – 136 с.
5. Тавровский и др. Млекопитающие Якутии / В.А. Тавровский, О.В. Егоров, В.Г. Кривошеев и др. – М.: Наука, 1971. – 660 с.
6. Соломонов Н.Г. Очерки популяционной экологии грызунов и зайца-беляка в Центральной Якутии. – Якутск, 1973. – 248 с.
7. Соломонов Н.Г. Сезонные аспекты экологии и физиологии грызунов и зайца-беляка в Центральной Якутии // Эколого-биологические исследования высоких широт. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. – С.3–14.
8. Винокуров В.Н., Ахременко А.К. Популяционная экология длиннохвостых сусликов Якутии. – Якутск, 1982. – 164 с.
9. Калабухов Н.И., Попков А.Ф., Шейкина Н.В. Изменчивость некоторых эколого-физиологических признаков у разных популяций сибирского длиннохвостого суслика (*Citellus undulatus* Pall.) // Экология. – 1976. – №3. – С.44–54.
10. Калабухов Н.И., Попков А.Ф., Сердюк В.А. и др. Адаптивное значение сезонных изменений жировых запасов у грызунов семейства беличьих (Scuridae), впадающих в спячку и активных в течение года // Общая биология. – 1980. – Т.41, № 1. – С. 88–103.
11. Ахременко А.К., Ануфриев А.И. Вариант метода исследования газообмена в открытой системе. Вид и его продуктивность в ареале: тез. докл. IV Всесоюз. совещания. Ч.1. Млекопитающие (насекомоядные, грызуны). – Свердловск, 1984. – С.4–5.
12. Ануфриев А.И., Соломонова Т.Н., Турпанов А.А., Соломонов Н.Г. Экологические механизмы формирования биологических ритмов у зимоспящих семейства Sciuridae северо-востока Сибири // Экология. – 2005. – № 5. – С. 343–348.
13. Ануфриев А.И. Экспериментальное исследование экологии зимней спячки (на примере *Citellus undulatus* Pallas, 1778): автореф. дис. ...к.б.н. – М., 1988. – 17 с.
14. Ануфриев А.И., Ядрихинский В.Ф., Исаев А.П. Изменения температуры тела у животных различной экологической специализации в годовом цикле // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2007. – Т.43, №3. – С.365.
15. Ануфриев А.И. Механизмы зимней спячки мелких млекопитающих Якутии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 158 с.
16. Ануфриев А.И. Динамика массы тела у сусликов (*Citellus undulatus*) в спячке // Экология. – 2002. – № 1. – С.73–76.
17. Ануфриев А.И. Экологические механизмы температурных адаптаций млекопитающих и зимующих птиц Якутии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 216 с.
18. Ахременко А.К., Ануфриев А.И., Соломонов Н.Г. и др. Зимняя спячка при температуре ниже нуля // Сибирский экологический журнал. – 1998. – № 3–4. – С. 347–352.
19. Васильев В.Н. Особенности зимней спячки черношапочного сурка (*M. camtschatica*) в Якутии // Зоол. журн. – 2000. – Т. 79, № 9. – С. 1114–1123.
20. Ortman S., Heldmaier G. Regulation of body temperature and energy requirements of hibernating Alpine marmots (*Marmota marmota*) // Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol. – 2000. – Vol. 278, № 3. – P.698–704.
21. Hut R.A., Barnes B.M., Daan S. Body temperature patterns before, during, and after semi-natural hibernation in the European ground squirrel // J. Comp. Physiol. [B]. – 2002. – Vol. 172(1). – P. 47–58.
22. Васильев В.Н. Экология зимней спячки черношапочного сурка (*Marmota camtschatica* P.1811): автореф. дис. ...к.б.н. – М., 1989. – 22 с.
23. Johnson, 1931; цит. по Калабухову, 1986; Калабухов Н.И. Спячка млекопитающих как сочетание энергетического баланса организма и естественного отбора // Эволюционные аспекты гипобии и зимней спячки. – Л.: Наука, 1986. – С. 6–17.
24. French A.R. Allometries of the duration of torpid and euthermic intervals during mammalian hibernation: a test of the theory of metabolic control of the timing of changes in body temperature // J. Comp. Physiol. [B]. – 1985. – Vol. 156. – P. 13–19.
25. Lyman Ch. P., Willis J.S., Malan A., Wang L.C.H. Hibernation and torpor in mammals and birds. – N.Y. – L.: Acad. Press, 1982. – 318 p.
26. Tøien O., Drew K. L., Chao M. L. and Rice M. E. Ascorbate dynamics and oxygen consumption during arousal from hibernation in Arctic ground squirrels // Am. J. Physiol. Reg. Integr. Comp. Physiol. – 2001. – Vol. 281. – P.572–583.
27. Osborne P. G., Hashimoto M. State-dependent regulation of cortical blood flow and respiration in hamsters: Response to hypercapnia during arousal from hibernation // J. Physiol. – 2003. – Vol. 547. – P. 963–970.

28. *Twenty J. W. and Twenty J. A.* Autonomic regulation of hibernation by *Citellus* and *Eptesicus* // *Strategies in the Cold: Natural Torpor and Thermogenesis*. – New York: Acad. Press., 1978. – P. 327–373.
29. *Harris M.B., Milsom W.K.* Parasympathetic influence on heart rate in euthermic and hibernating ground squirrels // *J. Exp. Biol.* – 1995. – Vol. 198. – P.931–937.
30. *Milsom W.K., Zimmer M.B. and Harris M.B.* Regulation of cardiac rhythm in hibernating mammals // *Comp. Biochem. Physiol.* – 1999. – Vol. (A) 124. – P.383–391.
31. *Слоним А.Д.* Экологическая физиология животных. – М.: Высшая школа, 1971. – 448 с.
32. *Калабухов Н.И.* Спячка млекопитающих. – М.: Наука, 1985. – 264 с.
33. *Buck C.L., Barnes B.M.* Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* – 2000. – Vol. 279, № 1. – P. 255–262.
34. *Ануфриев А.И., Ахременко А.К., Архипов Г.Г.* Бауты и уровень метаболизма у сусликов в спячке // Биологические проблемы Севера: тез. докл. XI Всесоюзного симпозиума: Адаптация человека и животных. – Якутск, 1986. – Вып. 5. – С. 69–70.
35. *Соломонов Н.Г., Ахременко А.К., Ануфриев А.И.* Динамика энергетических субстратов в тканях пробуждающихся сусликов // Механизмы зимней спячки. – Пушино, 1987. – С. 48–56.
36. *Ануфриев А.И., Ахременко А.К.* Энергетическая стоимость зимней спячки длиннохвостого суслика // *Экология*. – 1990. – № 5. – С. 68–72.
37. *Ануфриев А.И., Ахременко А.К.* Зимняя спячка и терморегуляция при температуре ниже нуля // *Экология*. – 1997. – №3. – С. 233–235.
38. *Ануфриев А.И., Архипов Г.Г.* Влияние размеров и массы тела на характер перезимовки у зимоспящих семейства *Sciuridae* северо-востока России // *Экология*. – 2004. – Т. 35, №3. – С. 189–194.
39. *Некипелов Н.В., Пешков Б.И.* Наблюдения над спячкой некоторых млекопитающих // *Изв. Иркутского гос. н.-и. противочумн. ин-та Сибири и Дальнего Востока*. – 1958. – Т. 20. – С. 29–37.
40. *Пауллер О.Ф.* О зимней спячке длиннохвостого суслика и условиях перезимовки блох в его гнезде // *Изв. Иркутского гос. н.-и. противочумн. ин-та Сибири и Дальнего Востока*. – 1959. – Т. 21. – С. 334–339.
41. *Васильев Г.И., Жовтый И.Ф.* Наблюдения за условиями перезимовки длиннохвостого суслика и его эктопаразитов // *Докл. Иркутского гос. н.-и. противочумн. ин-та Сибири и Дальнего Востока*. – Чита. 1974. – Т.10. – С. 218–221.
42. *Ипатьева Н.В.* Факторы, влияющие на выживаемость сусликов в период спячки и на их размножение: автореф. дис. ... к.б.н. – Л., 1968. – 25 с.
43. *Solomonov N.G., Anufriev A.I. and Solomonova T.N.* Mechanisms of hibernation in small mammals of Yakutia // *Cryobiology*. – 2010. – Vol. 61. – Issue 3. – P.397.
44. *Mayer W.V.* The protective value of the burrow system to the hibernating arctic ground squirrel, *S. undulatus* // *Anat. Rec.* – 1956. – Vol. 122. – P. 437–438.
45. *Barnes B.M.* Freeze avoidance in a mammal: body temperatures below 0°C in an Arctic hibernator // *Science*. – 1989. – Vol. 244. – P. 1593–1595.
46. *Solomonov N.G., Anufriev A.I., Solomonova T.N.* On the issue of phenomenon of winter hibernation of mammals // *Cryobiology*. – 2011. – Vol. 63. – Issue 3. – P. 340.
47. *Ануфриев А.И., Соломонов Н.Г., Ядрихинский В.Ф., Охлопков И.М.* Зимняя спячка черношапочного сурка *Marmota camtschatica* с температурой тела 0° и минус 1° // *ДАН*. – 2012. – Т. 447, № 6. – С.682–686.
48. *Капитонов В.И.* Черношапочный сурок // *Сурки: распространение и экология*. – М.: Наука, 1978. – С. 178–209.

Поступила в редакцию 27.01.2015