

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.583:547.2:550.42

О влиянии потоков углеводородов в системе лито-, гидро-, атмосфера на состояние современного климата

С.Х. Лифшиц^{*}, В.Б. Спектор^{**}, Б.М. Кершенгольц^{***}, В.В. Спектор^{**}

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

^{**}Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

^{***}Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

В последние 200 лет, наряду с увеличением концентрации CO_2 , беспрецедентно растет содержание CH_4 в атмосфере, обусловленное антропогенном. По принципу положительных обратных связей увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере может привести к потеплению, достаточному для разложения природных метановых гидратов, особенно тех, которые находятся в арктических морях и тундровой зоне в метастабильном состоянии. Вместе с тем известно, что в истории Земли выбросы CH_4 в атмосферу в связи с массовым разложением метановых гидратов приводили к климатически обусловленным биосферным катастрофам – это мезозойские и кайнозойские катастрофические потепления. Планетарная климатическая система в настоящее время находится в состоянии детерминистического хаоса. В этом состоянии даже относительно небольшие вклады в парниковый эффект могут вызвать значительные изменения в её функционировании, вследствие чего повышается ответственность человечества за выбор климатической системой дальнейшей траектории ее развития.

Ключевые слова: разложение арктических метангидратов, биосферные катастрофы, планетарная климатическая система.

In the last 200 years, together with the increase of CO_2 concentration there is unprecedented growth of CH_4 content in the atmosphere, caused by anthropogenic influence. According to the principle of positive feedback the increase of concentration of greenhouse gases in the atmosphere can lead to the warming up, sufficient for decomposition of natural methane hydrates, especially those, which are located in the Arctic seas and tundra zone in the metastable state. It is at the same time known that in the history of the Earth the ejections of CH_4 into the atmosphere in connection with the mass decomposition of methane hydrates led to the climatic-caused biospheric catastrophes which were Mesozoic and Cenozoic catastrophic warming ups. The planetary climatic system at present is in the state of deterministic chaos. In this state even relatively small contributions to the greenhouse effect can cause significant changes in its functioning, in consequence of which the responsibility of the humanity for selection by the climatic system of further trajectory of its development rises.

Key words: decomposition of arctic methane hydrates, biospheric catastrophes, planetary climatic system.

Планетарная климатическая система в настоящее время находится в состоянии детерми-

нистического хаоса. В этом состоянии даже относительно небольшие вклады в парниковый эффект могут вызвать значительные изменения в её функционировании. Значимую роль в парниковом эффекте играют выбросы метана, причем антропоген вносит преимущественный вклад в этот процесс. Вместе с тем известно, что в истории Земли выбросы метана в атмосферу в связи с массовым разложением метангидратов приводили к климатически обусловленным биосферным катастрофам – это мезозойские и кай-

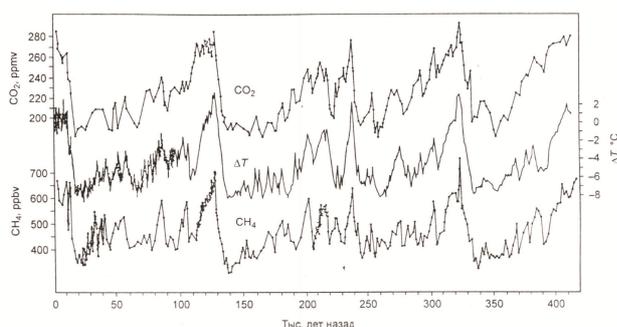
^{*}ЛИФШИЦ Сара Хаимовна – к.х.н., в.н.с., s.h.lifshits@ipng.ysn.ru; ^{**}СПЕКТОР Владимир Борисович – д.г.-м.н., г.н.с., vspektor@mail.ru;

^{***}КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич – д.б.н., проф., зам.директора по научной работе, kerschen@mail.ru;

^{**}СПЕКТОР Валентин Владимирович – к.г.н., и.о. зав. лаб., vvspektor@mpi.ysn.ru.

нозойские катастрофические потепления. В этой связи повышается ответственность человечества за выбор самоорганизующейся климатической системой дальнейшей траектории ее развития.

Современное потепление климата многие ученые связывают с увеличением парникового эффекта. Обогащение атмосферы различными газовыми примесями обусловлено источниками природного и антропогенного происхождения. Чередование относительно теплых и холодных периодов в истории Земли хорошо известно из геологических, геохимических и палеоклиматических данных. Наибольшие значения температуры и значительное повышение концентрации парниковых газов отмечены около 420 тыс. лет, 320, 235, 130 и 10 тыс. лет назад, т.е. с периодичностью 90–120 тыс. лет концентрации CO_2 и CH_4 интенсивно возрастали примерно от 180 до 280 ppmv и от 300 до 650–750 ppbv соответственно (рисунок), а амплитуда изменений среднегодовой температуры достигала 8–12 °C [1].



Корреляция концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере с изменениями температуры воздуха в Антарктиде в ледниковые и безледниковые периоды за 420 тыс. лет согласно [1]

С точки зрения влияния парниковых газов важно то, что эти колебания климата происходили по естественным причинам, когда антропогенное воздействие на окружающую среду, в том числе и на потоки парниковых газов в атмосферу, было крайне незначительным. Вклад техногенных источников в парниковый эффект стал значимым лишь в последние 200 лет. То

есть чисто антропогенным фактором невозможно объяснить наблюдающийся в последние 420 тыс. лет колебательный режим изменения планетарного климата.

Авторы работы [2] полагают, что климатический механизм можно рассматривать как саморегулируемую систему, а климатические автоколебания – как суммарный результат действия многих различных факторов, ведущую роль среди которых играет карбонатно-метановая система. В настоящее время наша планета пребывает на рубеже восходящей и нисходящей ветви последнего голоценового климатического планетарного цикла («климатический кризис»). То есть, самоорганизующийся климатический механизм функционирует в режиме «детерминистического хаоса», и в этот период даже относительно слабые воздействия биосферы и техносферы на ее карбонатно-метановый механизм саморегуляции могут оказать решающее влияние на выбор системой дальнейшей траектории ее эволюции [2].

В этой связи особенно возрастает роль антропогенного фактора, его вклад в потоки парниковых газов в атмосферу. Оценка потоков CO_2 в атмосферу представляет собой сложную задачу, поскольку их величина может существенно изменяться в зависимости от температуры земной поверхности и воды в Мировом океане, от активности вулканической деятельности и других факторов. Вклад антропогенного фактора в поток CO_2 в атмосферу оценивается в 21,3–27 млрд. т/год [1] (табл. 1). Антропогенные источники метана включают сельскохозяйственную деятельность человека, потери метана при добыче органического топлива и его промышленные выбросы, что дает среднегодовой поток по разным оценкам от 1,1 млрд. т/год [1] (табл. 1) до 0,35 млрд. т/год [3] (табл. 2).

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, если антропогенный поток CO_2 составляет около 3,7% от полного потока диоксида углерода, то для CH_4 – 37%.

Согласно работе [3], антропогенный поток метана составляет уже около 73 % от его сум-

Таблица 1

Глобальные потоки газов в атмосферу [1]

Источник	Газ					
	CO_2 , млрд. т/год	CH_4 , млрд. т/год	CO , млрд. т/год	SO_2 , млрд. т/год	N_2O , млрд. т/год	Суммарный поток, млрд. т/год
Природный	700	1,9	5,0	0,20–0,30	0,31–1,09	707,4–708,3
Антропогенный	21,3–27	1,1	0,36–0,70	0,13–0,21	0,03–0,11	22,9–29,1
Всего	721,3–727	3,0	5,36–5,70	0,33–0,51	0,34–1,20	730,3–737,4

О ВЛИЯНИИ ПОТОКОВ УГЛЕВОДОРОДОВ В СИСТЕМЕ ЛИТО-, ГИДРО-, АТМОСФЕРА

марного потока, т.е. превышает природный приблизительно в 2,7 раза (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
Мощность естественных и антропогенных источников метана [3]

Естественные источники, млн. т/год		Антропогенные источники, млн. т/год	
Болота	50–70	Рисовые поля	120±50
Озера	1–25	Животные	80
Океаны	1–17	Свалки	50±20
Тундра	15–35	Добыча угля	35±10
Насекомые	20	Потери при добыче газа	34±5
		Горение биомассы	30±15
Суммарная мощность	130±40	Суммарная мощность	350±100
Общая сумма 480±140			

При этом авторы не учитывают вклад легких углеводородов, испаряющихся при многочисленных разливах и утечках нефти и нефтепродуктов в процессах добычи, транспортировки, хранения и переработки. Нефтяная промышленность по опасности воздействия на окружающую среду занимает третье место в числе 130 отраслей современного производства [4]. На территории бывшего СССР ежегодно происходило 700 крупных аварий на газо- и нефтепроводах, при которых терялось 7–20 % добываемой нефти [4]. Общие мировые потери нефти составляют приблизительно 3 % от ее мировой добычи. 2 % от объема добываемой нефти теряется при транспортировке и хранении нефтепродуктов, около 75 % этих потерь приходится на испарение углеводородов из резервуаров и танкерных емкостей. Путем испарения из почвы удаляется от 20 до 40 % легкой фракции пролитой нефти [5], т.е. почти половина потерь нефти и нефтепродуктов поступает в атмосферу, усиливая парниковый эффект.

Концентрация основных парниковых газов CO₂ и CH₄ в атмосфере за последние 200 лет увеличилась соответственно на 30 и 145 %. В настоящее время их концентрация продолжает увеличиваться, и скорость ее роста составляет в год для CO₂ 0,42–0,5 %, для CH₄ – 0,6–1 % [1]. Очевидно, что в результате воздействия антропогенных источников современные концентрации CO₂ (360 ppmv) и особенно CH₄ (1720 ppbv) заметно превышают концентрации этих газов накануне индустриального периода (280 ppmv и 700 ppbv соответственно в 1800 г.) [1]. Углекислый газ является одним из основных парниковых газов, вклад которого в глобальное потепление наибольший и составляет 60 %. Доля антропогенных источников составляет 2–2,5 %, поскольку соотношение антропогенного и природного потоков 1: (25–30). Для метана, вклад которого в парниковый эффект оценивается в 15 %, антропогенный поток может составлять от 1/3 и более, следовательно, на долю антропогенных источников метана приходится от 5 % и выше глобального потепления [1, 3]. К этому необходимо добавить поток углеводородов, поступающий в атмосферу от испарения нефти и нефтепродуктов.

Концентрация метана в атмосфере примерно в 200 раз ниже, чем углекислого газа, однако радиационная активность его в 21 раз выше. Прирост концентрации метана беспрецедентен в последнее время и может привести к тому, что за ближайшие 50–60 лет произойдет удвоение его содержания в атмосфере [1, 6] (табл. 3).

Весьма возможно, что одним из источников метана в атмосфере служат наблюдаемые и скрытые выбросы метана при разложении природных газовых гидратов. Количество метана, которое таят в себе природные газовые гидраты, в 3000 раз превосходит его количество в атмосфере ((6–7)·10¹² м³) [6]. Освобождение этого парникового потенциала имело бы страшные последствия для человечества. Потепление мо-

Т а б л и ц а 3
Концентрация парниковых газов и их вклад в атмосферу [1]

Газ	Концентрация в приземной атмосфере		Скорость роста концентрации в настоящее время в год	Время жизни в атмосфере, годы	Вклад в потепление, %
	в 1800 г.	в настоящее время			
CO ₂	280 ppmv	360 ppmv	1,5 ppmv (0,42–0,5)%	120–250	60
CH ₄	700 ppbv	1720 ppbv	10–16 ppbv (0,6–1)%	10–12	15
CO	-	120 ppbv	1–1,5 ppbv (~1 %)	~0,3	-
N ₂ O	275ppbv	312 ppbv	~0,8 ppbv (0,2–0,25) %	120–150	5
NH ₃	-	60 ppbv	-	-	-
O ₃	-	10–50 ppbv	~0,15ppbv (0,5 %)	0,1	8
SO ₂	-	(0,1–2) ppbv	-	~0,02	-

жет вызвать разложение гидратов, а освобождающийся при этом метан, усиливая парниковый эффект, по принципу положительной обратной связи приведет к дальнейшему потеплению, т.е. начнется процесс самоускорения. В истории Земли такого рода события уже имели место. Это катастрофические мезозойские и кайнозойские потепления, так называемые «метановые катастрофы», сопровождающиеся глобальными океаническими аноксическими событиями (ОАЕ) [7, 8]. Последнее такое быстрое потепление (в течение нескольких тысячелетий) фиксируется на границе палеозоя и эоцена приблизительно 55 млн. лет тому назад. Для него употребляют климатическое название – PETM, что означает Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Механизм катастрофы представляют в виде следующей причинно-следственной цепочки: на первом этапе по каким-то причинам (наиболее вероятно, вулканическим) резко повысилась концентрация CO_2 в атмосфере. Накопление парникового газа в атмосфере привело к разогреву атмосферы и гидросферы, что, в свою очередь, по мнению многих ученых, спровоцировало разложение практически всех имеющихся на тот момент океанических газовых гидратов (около 1200 Гт, это примерно 1/10 часть современных запасов), что еще более усилило парниковый эффект. Температура поверхностных слоев океана повысилась по разным оценкам от 6 до 13 °C [7, 8].

В результате резкого потепления, таяния ледников, опреснения поверхностных вод создавалась плотностная стратификация океана: глубинные воды перестали снабжаться кислородом, что убило большую часть бентоса. Кроме того, обеднение океанических вод кислородом могло произойти частично и за счет расходования его на окисление метана. Аноксия предохраняет от аэробного окисления органическое вещество, опускающееся на дно. Коэффициент его фоссилизации (не превышающий в современном океане 0,05% от исходного содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в живом веществе) резко подскакивает. Так вместо осадков с околосредовыми содержаниями $\text{C}_{\text{орг}}$ на уровне 0,1–0,5% формируются углеродистые осадки (будущие черные сланцы) с гораздо более высокими содержаниями $\text{C}_{\text{орг}}$, иногда превышающими 10 % [7]. Таким образом, по мнению [7], черносланцевые эпизоды, связанные с ОАЕ, оказываются «черными страницами летописи биосферы». Если учесть, что черносланцевые формации являются потенциально нефтематеринскими, то можно предположить, что климатически обусловленные биосферные катастрофы инициируют процессы формирования каустобиолитов, в том числе

нефтеобразование. Накопление черных сланцев означало уход больших масс углерода из гипергенного цикла «атмосфера–биосфера–атмосфера». Усиленное захоронение $\text{C}_{\text{орг}}$ на протяжении 200 тыс. лет привело к снижению pCO_2 атмосферы, парниковый эффект уменьшился, наступило похолодание, аномальная черносланцевая седиментация сменилась нормальной.

Скорость нарастания концентрации метана в атмосфере в настоящее время настолько велика (табл. 3), что это не может не вызвать беспокойство многих ученых. Согласно обзору [7], на 19-й ежегодной Гольдшмидтовской Международной геохимической конференции, состоявшейся в 2009 г. в Давосе, около трети всех докладов было посвящено данной проблеме.

По мнению новосибирских ученых [6], имеющиеся на сегодня упрощенные оценки изменения температурных профилей земной коры приводят к следующим заключениям. Субмаринные газовые гидраты, расположенные в акватории Мирового океана, внутренних морей и озер, опасений пока не вызывают. При любом развитии событий они останутся стабильными в ближайшую тысячу лет. Наибольшую опасность представляют гидраты, которые уже сейчас находятся в метастабильном состоянии (в зонах вечной мерзлоты и на дне Северного Ледовитого океана). Особенно подвержены изменению климата газогидратные отложения континентальных арктических шельфов. Благодаря поднимающемуся уровню моря они испытывают повышение поверхностных температур. Количество метана, освобождающегося из этого источника, в конце прошлого столетия уже составляло около $5,6 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$, т.е. около 1% всех известных источников атмосферного метана. Критической для данного источника является температура $-2-0^\circ\text{C}$, выше которой перестает действовать эффект самоконсервации и начинается обвальное разложение газовых гидратов.

Шельф морей Восточной Арктики (ВАШ) включает море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское, является самым обширным и мелководным шельфом Мирового океана; вмещает значительную часть мелководных газогидратов и 80 % субаквальной мерзлоты [9, 10]. Вследствие этого ВАШ оказывает большое влияние на обеспечение устойчивости климатической системы Земли. Подсчет эмиссии метана со дна ВАШ свидетельствует о существенном вкладе региона в баланс парниковых газов атмосферы. В этой области имеют место аномально высокая концентрация метана в воде [11, 12], высокий фоновый поток метана и высокодебитные локальные источники газа [9]. Так эмиссия метана

в среднем составляет 3 мг/м²·сут, а из локализованных плюмов метана на шельфе – 13 мг/м²·сут [9]. За период, свободный ото льда, локальные источники метана на шельфе поставляют до 13,7·10⁴ г·км⁻² метана в течение года [11]. Со дна Ледовитого океана (в море Бофорта) в настоящее время также наблюдаются признаки подъема масс метана [13]. Просачивание из осадочных толщ и распад газогидратов поставляют на сегодняшний день метана примерно столько же, сколько все его источники на суше [14].

Многочисленные наблюдения показывают, что газогидраты могут находиться и у самой поверхности дна в том случае, если содержание гидратообразующего газа превышает предел растворимости его в воде [15]. Для поддержания высокой концентрации газа в случае образования метангидратов необходимо существование постоянного подтока метана у поверхности дна. Вероятно, имеет место образование диссипативных газогидратных структур на стоке выбросов глубинных флюидов. Это подтверждается и имеющимися наблюдениями: все известные гидратопроявления приурочены к местам разгрузки глубинных флюидов [15]. Вполне вероятно, что на дне морей Восточной Арктики присутствуют подобные газогидраты. Последние находятся в неустойчивом состоянии и разрушаются даже при небольших вмешательствах в окружающую среду. Так в море Лаптевых в районе дельты р. Лены наблюдались выбросы газа из донных источников, вызванные работой судового двигателя [16]. При этом в отдельных случаях возникали выбросы с мощностью 0,7–2,1 г СН₄/с, сопоставимые с мощностями глубоководных грязевых вулканов.

На территории одного из самых холодных регионов планеты, Северо-Востоке Азии, например, за последние 50 лет рост среднегодовых температур происходит с трендом 0,06–0,09 °С/год [17]. При сохранении такого тренда современная температура мерзлоты на подошве слоя годовых теплооборотов (–8...–6 °С) в этом регионе может подняться до критического уровня за 60–80 лет.

Из вышеизложенного следует, что в условиях «климатического кризиса», который в настоящее время переживает наша планета, антропогенный фактор может внести необратимые последствия в выбор саморегулируемой климатической системой дальнейшей траектории ее развития. Не хочется, чтобы деятельность человека спровоцировала новую «метановую катастрофу» в истории Земли и современная биота стала источником накопления каустобиолитов для, возможно, последующих цивилизаций.

Работа выполнена в рамках партнерского Интеграционного проекта №9 СО РАН и ДВО РАН «Сопоставление эволюции природной среды Сибири и Дальнего Востока по основным временным срезам позднего кайнозоя», 2012–2014 гг.

Литература

1. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Турунтаев С.Б. Соотношение антропогенной и природной составляющих в потоке газов в атмосферу // Глобальные изменения природной среды. – Новосибирск: СО РАН «Гео», 2001. – С. 249–264.
2. Спектор В.Б., Кершенгольц Б.М., Лифшиц С.Х., Спектор В.В. Карбонатно-метановая система саморегуляции планетарного климата // Известия РАН. Серия географическая. – 2007. – № 6. – С. 1–12.
3. Бажин Н.М. Метан в атмосфере // Соровский образовательный журнал. Химия. – 2000. – Т. 6, № 3. – С. 52–57.
4. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
5. Гольдберг В.М., Зверев В.П., Арбузов А.И. и др. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. – М.: Наука, 2001. – 125 с.
6. Дядин Ю.А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты // Соровский образовательный журнал. Химия. – 1998. – № 3. – С. 55–64.
7. Юдович Я.Э. Давосская геохимическая мода-2009 // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2009. – № 7. – С. 25–33.
8. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. Оценка возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад // ДАН. Геофизика. – 2007. – Т. 413, № 6. – С. 816–819.
9. Сергиенко, И.П., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деграция подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. – 2012. – Т. 446, № 3. – С. 330–335.
10. Криотермия и натуральные газогидраты в Северном Ледовитом океане / Под ред. В.А. Соловьева и др. – Л.: Севморгео, 1987. – 150 с.
11. Shakhova N., Semiletov I. Methane realize and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // Journal of Marine Systems. – 2007. – V. 66. – P. 227–243.
12. Шахова Н.Е., Алексеев В.А., Семилетов И.П. Прогноз эмиссии метана на Восточно-Сибирском шельфе // ДАН. – 2010. – Т. 430, № 4. – С. 533–536.
13. Paull C.K., Ussler W., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea-

shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – V. 34, № 1.

14. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I. et al. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change // *Geofluids*. – 2002. – № 2. – P. 109–122.

15. Анфилатова Э.А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях ми-

ра // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. Т.3, №4. http://www.ngtp.ru/9/44_2008.pdf.

16. Шахова Н.Е., Юсупов В.А., Салюк А.Н. и др. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // *ДАН*. – 2009. – Т. 429, № 3. – С. 398–401.

17. Гаврилова М.К. Районирование (зонирование) Севера Российской Федерации // Районирование (зонирование) Севера Российской Федерации. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2007. – С. 64–98.

Поступила в редакцию 12.03.2015

УДК 551.464.6.027:551.322

Изотопный состав атмосферных осадков и снежного покрова в г. Якутске

Н.С. Малыгина*, Т.С. Папина*, А.Н. Эйрих*, А.Ф. Жирков**, М.Н. Железняк**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

**Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

Приводятся данные изотопного состава атмосферных осадков и снежного покрова в районе г. Якутска в зимний период 2013–2014 гг. Полученные результаты согласуются с опубликованными средними значениями изотопного состава атмосферных осадков для зимнего сезона 2000/2001 г. Совокупное использование результатов изотопного анализа атмосферных осадков и снежного покрова позволило получить уточнённое уравнение локальной линии метеорных вод для зимнего периода в районе г. Якутска, значения коэффициента и свободного члена в котором близки к значениям глобальной линии метеорных вод. Получены уточненные зависимости изотопного состава зимних атмосферных осадков от температуры воздуха в районе г. Якутска, которые близки к значениям для холодных регионов Северного полушария.

Ключевые слова: атмосферные осадки, снежный покров, изотопный состав.

The paper presents the data on precipitation and snow cover isotopic composition in the area of Yakutsk city in winter 2013–2014. The results are in agreement with the published average data on the precipitation isotopic composition for cold seasons 2000/2001. The combined use of atmospheric precipitation and snow cover isotopic analysis results allowed us to specify the equation of local meteoric water line for the winter period in the area of Yakutsk, where the coefficient and the constant term are close to the global meteoric water line. Specified dependencies of the isotopic composition of winter precipitation on the temperature in the area of Yakutsk are obtained which are close to the values for the cold regions of Northern Hemisphere.

Key words: precipitation, snow cover, isotopic composition.

Введение

Значительные климатические изменения в последние десятилетия отмечаются в разных

регионах Земли, но особенно резкие, носящие экстремальный характер, чаще всего фиксируются в средних и высоких широтах Северного полушария [1]. В пятом докладе I Рабочей группы МГЭИК значительное внимание уделено оценке региональных климатических изменений в связи с тем, что именно совокупность региональных оценок и прогнозов этих изменений в климатической системе даст наиболее точный общий глобальный прогноз. Результаты моделирования, представленные в разделе «Климатические явления: актуальность для будущих изменений регионального климата», показали,

*МАЛЫГИНА Наталья Сергеевна – к.г.н. г., н.с., natmgn@gmail.com; *ПАПИНА Татьяна Савельевна – д.х.н., начальник Химико-аналитического центра, tanya.papina@mail.ru; *ЭЙРИХ Алла Николаевна – к.т.н., н.с., allnik608@gmail.com; **ЖИРКОВ Александр Федотович – н.с., zhirkov_af@mail.ru; **ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – д.г.-м.н., директор, fe@mpi.usn.ru.

shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – V. 34, № 1.

14. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I. et al. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change // *Geofluids*. – 2002. – № 2. – P. 109–122.

15. Анфилатова Э.А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях ми-

ра // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. Т.3, №4. http://www.ngtp.ru/9/44_2008.pdf.

16. Шахова Н.Е., Юсупов В.А., Салюк А.Н. и др. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // *ДАН*. – 2009. – Т. 429, № 3. – С. 398–401.

17. Гаврилова М.К. Районирование (зонирование) Севера Российской Федерации // Районирование (зонирование) Севера Российской Федерации. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2007. – С. 64–98.

Поступила в редакцию 12.03.2015

УДК 551.464.6.027:551.322

Изотопный состав атмосферных осадков и снежного покрова в г. Якутске

Н.С. Малыгина*, Т.С. Папина*, А.Н. Эйрих*, А.Ф. Жирков**, М.Н. Железняк**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

**Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

Приводятся данные изотопного состава атмосферных осадков и снежного покрова в районе г. Якутска в зимний период 2013–2014 гг. Полученные результаты согласуются с опубликованными средними значениями изотопного состава атмосферных осадков для зимнего сезона 2000/2001 г. Совокупное использование результатов изотопного анализа атмосферных осадков и снежного покрова позволило получить уточнённое уравнение локальной линии метеорных вод для зимнего периода в районе г. Якутска, значения коэффициента и свободного члена в котором близки к значениям глобальной линии метеорных вод. Получены уточнённые зависимости изотопного состава зимних атмосферных осадков от температуры воздуха в районе г. Якутска, которые близки к значениям для холодных регионов Северного полушария.

Ключевые слова: атмосферные осадки, снежный покров, изотопный состав.

The paper presents the data on precipitation and snow cover isotopic composition in the area of Yakutsk city in winter 2013–2014. The results are in agreement with the published average data on the precipitation isotopic composition for cold seasons 2000/2001. The combined use of atmospheric precipitation and snow cover isotopic analysis results allowed us to specify the equation of local meteoric water line for the winter period in the area of Yakutsk, where the coefficient and the constant term are close to the global meteoric water line. Specified dependencies of the isotopic composition of winter precipitation on the temperature in the area of Yakutsk are obtained which are close to the values for the cold regions of Northern Hemisphere.

Key words: precipitation, snow cover, isotopic composition.

Введение

Значительные климатические изменения в последние десятилетия отмечаются в разных

регионах Земли, но особенно резкие, носящие экстремальный характер, чаще всего фиксируются в средних и высоких широтах Северного полушария [1]. В пятом докладе I Рабочей группы МГЭИК значительное внимание уделено оценке региональных климатических изменений в связи с тем, что именно совокупность региональных оценок и прогнозов этих изменений в климатической системе даст наиболее точный общий глобальный прогноз. Результаты моделирования, представленные в разделе «Климатические явления: актуальность для будущих изменений регионального климата», показали,

*МАЛЫГИНА Наталья Сергеевна – к.г.н. г., н.с., natmgn@gmail.com; *ПАПИНА Татьяна Савельевна – д.х.н., начальник Химико-аналитического центра, tanya.papina@mail.ru; *ЭЙРИХ Алла Николаевна – к.т.н., н.с., allnik608@gmail.com; **ЖИРКОВ Александр Федотович – н.с., zhirkov_af@mail.ru; **ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – д.г.-м.н., директор, fe@mpi.usn.ru.

что к 2035 г. в средних и высоких широтах сумма годовых атмосферных осадков может увеличиться почти на 20 %, а повышение средней годовой температуры воздуха может достичь 3 °C [1]. Дополнительно указывается, что данные изменения, вероятно, произойдут раньше и будут иметь наибольшие значения во внутриконтинентальных и приполярных регионах.

Альтернативным «классическому» моделированию прогнозных оценок атмосферных осадков и источников их поступления служит моделирование климатических изменений на основе данных по составу стабильных изотопов воды (^1H , D , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O). Изотопный состав атмосферных осадков характеризуется значительными вариациями, как во времени, так и пространстве. Закономерное распределение изотопного состава атмосферных осадков описывается уравнением $\delta^2\text{H}=8 \cdot \delta^{18}\text{O}+10$ [2], именуемым глобальной линией метеорных вод – ГЛМВ. Эмпирические зависимости изменений изотопного состава атмосферных осадков от приземной температуры воздуха, относительной влажности атмосферы и количества осадков впервые были научно обоснованы В. Дансгаром [3], а затем уточнены в работе [4].

Зависимости между $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$ или δD) и температурой, впервые установленные В. Дансгаром [3] по данным почти 40 континентальных и островных станций Атлантического региона и имеющие вид: $\delta^{18}\text{O}=0,69t^\circ-13,6$ и $\delta^2\text{H}=5,6t^\circ-100$, успешно используются в качестве «изотопного палеотермометра» [5]. Возможные принципиальные ограничения при традиционной интерпретации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в качестве изотопного палеотермометра в средних и высоких широтах обоснованы в работе [6]. Расчетный показатель – дейтериевый эксцесс (d-excess – сокращенно d_{exc}), предложенный В. Дансгаром [3] на основе зависимости значений стабильных изотопов в атмосферных осадках ($d_{\text{exc}}= \delta\text{D}-8 \cdot \delta^{18}\text{O}$), эффективно применяется при идентификации источников водяного пара или атмосферных осадков [7–8], что является очень важным при «изотопном» моделировании как прошлых, так и будущих климатических изменений.

К сожалению, имеется ограниченное количество работ по изучению изотопного состава атмосферных осадков на территории России. Тем не менее, для отдельных регионов проведены детальные исследования как российскими, так и зарубежными учеными. Например, В. С. Брезгуновым с соавторами [9] установлена связь между средней годовой температурой воздуха и значениями $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках для севера России. Под руководством Ю. К. Василь-

чука проводились исследования, как в «холодных», так и горных регионах [10–12]. Для части территории Восточной Сибири так же был определен изотопный состав атмосферных осадков и предприняты попытки идентифицировать источники их поступления [13–14].

Целью нашей работы является изучение изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) зимних атмосферных осадков и снежного покрова в Центральной Якутии (в районе г. Якутска) и определение зависимости изменений изотопного состава атмосферных осадков и температурных условий зимнего периода 2013–2014 гг.

Город Якутск расположен в центральной части Восточной Сибири, в среднем течении р. Лены. Территория ограничена с востока и северо-востока Верхоянским хребтом, с юга Алданским нагорьем (рис. 1). В природно-климатическом отношении Центральная Якутия отличается высокой континентальностью климата со значительными внутригодовыми изменениями температур воздуха (средние амплитуды между среднемесячными значениями около 60 °C) и количеством осадков около 235 мм (1961–1990 гг.), сравнимым с количеством осадков в степных и полупустынных регионах [15–16]. Согласно исследованиям Ю. Б. Скачкова [16], в последние десятилетия на территории Центральной Якутии наблюдаются значительные межгодовые колебания атмосферных осадков, имеющих противоположные тенденции, как для годовых значений, так и отдельных сезонов года.



Рис. 1. Территория Центральной Якутии и местоположение г. Якутска

Материалы и методы исследований

На территории научного стационара «Туймаада» (Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск) в течение зимнего периода 2013–2014 гг. нами был проведен отбор проб твердых атмосферных осадков. Всего за исследуемый период отобрано 78 % от общего количества случаев выпадения осадков за сезон. В ходе отбора

атмосферных осадков фиксировались их объем, продолжительность выпадения, а также основные метеопараметры окружающей среды. Оценка синоптических условий на время выпадения осадков проводилась на основе данных наблюдений на стационаре «Туймаада», а также сайта [17], на котором информация о фактической погоде в г. Якутске представлена из двух источников: с сервера метеоданных международного обмена (NOAA, США) и автоматической системы передачи данных Росгидромета.

Атмосферные осадки, собранные непосредственно после окончания снегопада, помещались в пластиковые герметичные контейнеры и до начала анализа (включая время транспортировки) хранились в замороженном виде. Дополнительно на территории стационара были отобраны послойные пробы снежного покрова, которые также хранились в герметичных контейнерах в замороженном виде до проведения анализа.

Анализ состава стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) в пробах атмосферных осадков был выполнен в химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул). Методика выполнения анализа включала следующие этапы: пробы атмосферных осадков и снега растапливали при комнатной температуре, затем фильтровали, помещали в герметично закрывающиеся пробирки и до начала проведения анализа хранили в холодильнике. Определение стабильных изотопов выполнялось методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i, оснащенный системой WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy). Использование технологии (WS-CRDS) позволило устранить спектральные наложения [18] и достигнуть высокой точности и воспроизводимости определения содержания δD и $\delta^{18}\text{O}$ в анализируемых образцах. Точность измерения δD и $\delta^{18}\text{O}$ (1σ , $n = 5$) составила $\pm 0,4\text{‰}$ и $\pm 0,1\text{‰}$, соответственно. В качестве внутренних стандартов использовались пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта V-SMOW-2 (МАГАТЭ).

Результаты и их обсуждение

Результаты изотопного анализа атмосферных осадков в г. Якутске в зимний период 2013–2014 гг. показали, что значения $\delta^{18}\text{O}$ в них изменяются от $-22,6$ до $-38,5\text{‰}$, а δD – от $-171,2$ до $-296,0\text{‰}$. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными для средних значений за три зимних месяца (декабрь–февраль) [19], равными $\delta^{18}\text{O}$ $-33,0\text{‰}$ и δD $-265,8\text{‰}$. Значения результатов изотопного анализа графически расположены выше ГЛМВ

(рис. 2). Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), построенная по полученным нами данным, описывается уравнением $\delta\text{D}=7,78\cdot\delta^{18}\text{O}+10,1$, аппроксимирующим результаты изотопного анализа осадков при достоверности $R^2=0,99$. В данном уравнении угловой коэффициент несколько ниже значения «8», что говорит об отсутствии существенного изотопного фракционирования анализируемых атмосферных осадков, а его близость к результатам, полученным для зимних осадков г. Иркутска (8,05) и г. Хабаровска (7,85) [20], говорит о высокой степени достоверности полученных нами результатов.

Фракционирование изотопов в атмосферных осадках определяется, в первую очередь, температурой [21]. Однако связь температурных условий и изотопного состава атмосферных осадков имеет региональные особенности, обусловленные, прежде всего, широтным и континентальным эффектом. При этом наиболее тесная взаимосвязь $\delta^{18}\text{O}$ и δD с температурой воздуха прослеживается в умеренных и высоких широтах континентальных регионов в зимний период [21].

Уравнение регрессии, описывающее зависимость изменения изотопного состава атмосферных осадков г. Якутска от температуры воздуха в зимний период 2013–2014 гг., имеет следующий вид: $\delta^{18}\text{O}=0,59t^\circ-19,7$ ($R^2=0,88$) и $\delta\text{D}=4,16t^\circ-149,38$ ($R^2=0,89$). Рассчитанные коэффициенты близки к значениям, полученным для 40 станций ВМО [3] и равным 0,69 и 5,6 для $\delta^{18}\text{O}$ и δD , а «свободные члены» уравнений имеют более низкие значения, отражая континентальный эффект [21–22].

В снежном шурфе из трех визуально выделенных горизонтов послойно были отобраны

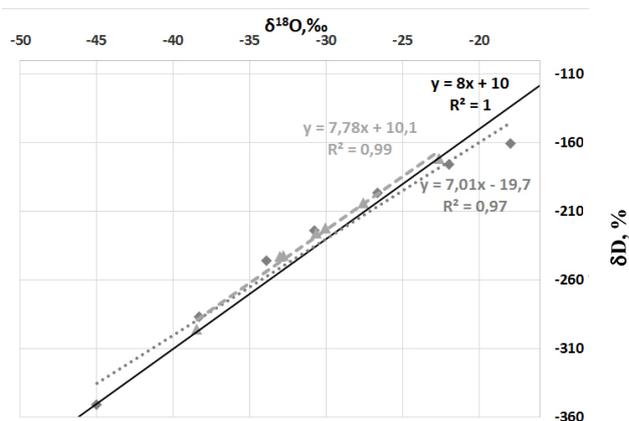


Рис. 2. Диаграммы $\delta^{18}\text{O}$ и δD изотопного состава атмосферных осадков (светло-серая штриховая линия) и снежной толщи на стационаре «Туймаада» (серая пунктирная линия), ГЛМВ (черная сплошная линия)

пробы снега через каждые 3 см. Нижний горизонт был представлен глубинной изморозью и крупными прозрачными ледяными кристаллами, его мощность составляла 6 см. Второй горизонт имел мощность 12 см и состоял из среднезернистого снега белого цвета, в толще данного горизонта было отобрано четыре пробы. Верхний горизонт, мощность около 3 см, состоял из свежевыпавшего (частично уплотнённого метелевого) снега, что позволило отобрать только одну пробу.

Результаты изотопного анализа проб снежного покрова (рис. 2) показали, что от слоя к слою значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD изменяются в широком диапазоне: от $-17,9$ до $-45,0$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от $-160,6$ до $-350,6$ ‰ для δD . При этом изотопически существенно были утяжелены нижние слои снега (на графике точки ниже ГЛМВ), как относительно других слоев снежного покрова, так и атмосферных осадков. Для снежного покрова ЛЛМВ описывается уравнением $\delta\text{D}=7,01 \cdot \delta^{18}\text{O}-19,7$. Полученные значения угла наклона несколько ниже значений (ЛЛМВ) зимних атмосферных осадков, а также значений ГЛМВ, что позволяет говорить о метаморфизации изотопного состава снежного покрова.

Для оценки степени метаморфизации снежного покрова дополнительно для каждой пробы был рассчитан дейтериевый эксцесс (d_{exc}) – рис. 3.

Для нижнего слоя – глубинной изморозии значения d_{exc} были наиболее отрицательными и изменялись от $-17,1$ до $-0,3$ ‰, что связано с влиянием термического градиента, обуславливающего переход водяного пара из грунта, содержащего смесь изотопически более тяжелых дождевых осадков и талой воды в вышележащий снег [23]. С этими же процессами связаны более высокие значения δD (порядка 20 ‰) в нижнем слое по сравнению с вышележащими. Стоит отметить, что угол наклона для этого

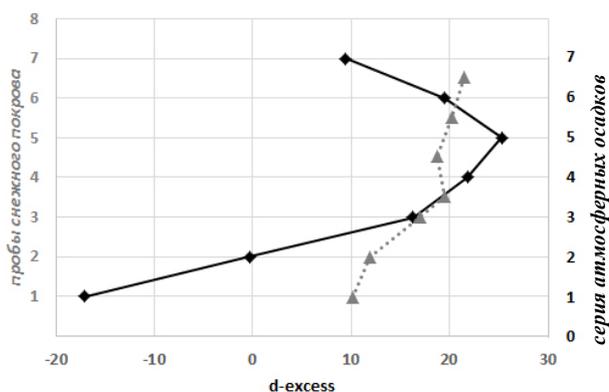


Рис. 3. Профиль d_{exc} атмосферных осадков (чёрная кривая) и снежной толщи на стационаре (серая пунктирная кривая)

слоя составил 4, что подтверждает наличие диффузного разделения изотопов (диффузный перенос влаги из почвы в нижние слои снежного покрова), для которого характерны углы наклона от 2 до 5 [23].

В вышележащих горизонтах снежного покрова значения d_{exc} варьировали от $+16,3$ до $+25,3$ ‰. Такие относительно высокие величины, рассчитанные как для снежной толщи, так и для атмосферных осадков, свидетельствуют об испарении начальной влаги в холодную и очень сухую атмосферу. Такая синоптическая ситуация создает экстремально неравновесные условия для формирования изотопного состава анализируемых атмосферных осадков, составивших данный слой. Несущественные превышения значений d_{exc} отмечены во втором визуальном слое снежного покрова. Это связано, как с возможным кинетическим фракционированием изотопного состава при понижающихся температурах [24], что подтверждают данные метеорологической станции, так и с влиянием нижележащего слоя (возгонка водяного пара) [24], что приводит к увеличению значений d_{exc} .

Верхний слой снежного покрова характеризуется наиболее облегченным составом ($\delta^{18}\text{O}=-45,0$ ‰ и $\delta\text{D}=-350,6$ ‰) относительно нижележащих слоев и проанализированных атмосферных осадков. Отличия значений изотопного состава верхнего слоя снежного покрова и значений атмосферных осадков связаны со следующим. Последняя серия осадков, составляющая верхний горизонт, выпадала при сильном ветре, скорость которого достигала 10 м/с, что привело к их существенному выдуванию из пробоотборника. В связи с этим малое количество атмосферных осадков не позволило провести анализ их изотопного состава. Стоит отметить, что территория места отбора проб снежного покрова относительно защищена лесным массивом, что повлияло на хорошую сохранность данного слоя и позволило отобрать пробу верхнего горизонта снежного покрова, сформированного последней серией осадков.

Значения d_{exc} верхнего слоя существенно снижаются относительно значений предыдущего визуально выделенного слоя снежного покрова и близки к значениям d_{exc} ГЛМВ, равным 10 ‰. Это позволяет сделать предположение о незначительном изотопном фракционировании данного слоя и с большой степенью уверенности предположить, что источником атмосферных осадков, сформировавших данный слой, была Атлантика. При этом по пути от источника испарения к месту выпадения осадков (г. Якутск), в равновесных условиях происходило изотопическое облегчение атмосферных осадков.

Принимая во внимание, что верхний слой снежного покрова сформирован относительно изотопически не метаморфизованными осадками, предлагается использовать значения его изотопного состава для уточнения ЛЛМВ, построенной по изотопным данным атмосферных осадков. С учетом верхнего слоя снежного покрова ЛЛМВ будет описываться уравнением $\delta D = 8,19 \cdot \delta^{18}O + 21,9$ при возросшей аппроксимации ($R^2 = 0,99$), а значение углового коэффициента будет наиболее близким к значению коэффициента ГЛМВ.

Используя значения изотопного состава верхнего слоя снежного покрова и температуры воздуха в момент выпадения осадков, составивших этот слой, к расчету зависимостей изотопного состава атмосферных осадков от температурных условий зимнего периода 2013–2014 гг., получаем уравнения регрессии следующего вида: $\delta^{18}O = 0,68 t^\circ - 18,3$ ($R^2 = 0,96$) и $\delta D = 5,52 t^\circ - 129,8$ ($R^2 = 0,95$). Рассчитанные в этих уравнениях коэффициенты близки к значениям, полученным В. Дансгаром [3], а также для регионов со среднегодовой температурой ниже 15°C [5].

Заключение

Исследование изотопного состава атмосферных осадков и снежного покрова в районе г. Якутска в зимний период 2013–2014 гг. показало их существенное варьирование (от $-17,9\%$ до $-45,0\%$ для $\delta^{18}O$ и от $-160,6\%$ до $-350,6\%$ для δD) и хорошее согласование с ранее опубликованными данными для зимнего сезона 2000/2001 г. Снежный покров в зимний период 2013–2014 гг. в районе г. Якутска характеризовался изотопной метаморфизацией, обусловленной диффузным переносом влаги и кинетическим фракционированием при понижающихся температурах. Полученные значения изотопного состава атмосферных осадков и снежного покрова позволили уточнить ЛЛМВ, описываемую уравнением $\delta D = 8,19 \cdot \delta^{18}O + 21,9$, которое близко к уравнению ГЛМВ. Уточненные зависимости изотопного состава зимних атмосферных осадков от температуры в районе г. Якутска описываются уравнениями $\delta^{18}O = 0,68 t^\circ - 18,3$ и $\delta D = 5,52 t^\circ - 129,8$ и близки к уравнениям, полученным для холодных регионов Северного полушария.

Литература

1. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
2. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. – 1961. – Vol. 133. – С. 1702–1703.
3. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. – 1964. – Vol. 16. – P. 436–468.
4. Rozanski K., Araguafis-Araguafis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records*, *Geophys. Monogr.* – 1993. – Vol. 78. – P. 1–36.
5. Jouzel J., Petit J. R., Souchez R. et al. Evidence of more than 200 m thick of lake ice above the subglacial lake Vostok, Central East Antarctica // *Science*. – 1999. – Vol. 286. – P. 2138–2141.
6. Fricke H., O'Neil J. The correlation between $^{18}O/^{16}O$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1999. – Vol. 170. – P. 181–196.
7. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship in precipitation // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84. – P. 5029–5033.
8. Froehlich K., Gibson J.J., Aggarwal P.K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance // *Study of environmental change using isotope techniques*. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. – P. 54–65.
9. Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В. Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии, их связь с использованием температуры // *Водные ресурсы*. – 1998. – Т. 25, № 1. – С. 73–84.
10. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В., Буданцева Н.А. Высотный изотопный эффект в снеге на леднике Гарабаша в Приэльбрусье // *Криосфера Земли*. – 2005. – Т. 9, № 4. – С. 72–81.
11. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В., Буданцева Н.А. Изотопный состав языка ледника Большой Азау в Приэльбрусье // *Криосфера Земли*. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 56–68.
12. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н. Высотный градиент распределения $\delta^{18}O$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // *Криосфера Земли*. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 13–21.
13. Kurita N., Numaguti A., Sugimoto A. et al. Relationship between the variation of isotopic ratios and the source of summer precipitation in eastern Siberia // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108 (D11) 339, doi:10.1029/2001JD001359.
14. Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y. et al. Isotopic composition and origin of snow over Siberia // *J. Geophys. Res.* – 2005. – Vol. 110, D13102, doi:10.1029/2004JD005053.
15. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. – Якутск: Якутское книжн. изд-во, 1962. – 63 с.
16. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения климата Центральной Якутии на рубеже XX–XXI вв. // Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии: Материалы Межд. науч. конф. (17–21 сентября 2012 г., Иркутск). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2012. – Т. 1. – 254 с.

17. <http://rp5.ru/docs/about/ru>.
 18. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf>.
 19. Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109, D03102, doi:10.1029/2003JD003404.
 20. Araguás-Araguás L., Froehlich K., Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103(D22). – P. 28721–28742.
 21. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геохронологии и гляциологии. – М.:

Изд-во МГУ, 2000. – 616 с.

22. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
 23. Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism / Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, San Antonio / Taylor H. P., O'Neil J. R. and Kaplan I. R. (Eds), 1991. – P. 211–221.
 24. Hou S.G., Wang Y.T., Pang H.X. Climatology of stable isotopes in Antarctic snow and ice: Current status and prospects // Chin Sci Bull. – 2013. – Vol. 58. – P. 1095–1106, doi: 10.1007/s11434-012-5543-y.

Поступила в редакцию 20.05.2015

УДК 551.52; 551.593

Температурный эффект аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии

М.С. Васильев, С.В. Николашкин

Институт космических исследований и аэронавтики СО РАН, г. Якутск

Приводятся результаты исследования температурного эффекта аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг. Используются данные натурных и спутниковых измерений, а также климатических моделей NCEP/NCAR и ERA-Interim на основе тех же измерений. Данные по аэрозольному содержанию и распределению по размерам частиц получены по измерениям на солнечном фотометре CE-318 сети «AERONET» около Якутска. Впервые показано, что возмущение атмосферы аэрозольными частицами от воздействия очагов возгорания лесного массива приводит к снижению потока прямой солнечной радиации и при наличии отрицательной фазы уходящей длинноволновой наблюдается понижение приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: приземная температура воздуха, аэрозоль, радиационный бюджет, квазинедельные ритмы, климатические модели.

The results of an investigation of temperature effect of aerosol in the summer season over the central part of Yakutia during the period 2004–2014 are presented. The data of ground-based and satellite measurements and also of climate models NCEP/NCAR and ERA-Interim, which are based on the same measurements. Aerosol depth and particle size distribution data are obtained using «AERONET» CE-318 sunphotometer near Yakutsk. It is first time showed that a disturbance of the atmosphere by aerosol particles which is caused by forest fires area lead to a decrease of direct solar radiation flow and in an additional presence of a negative phase of upward longwave one, a surface air temperature decreasing is observed.

Key words: surface air temperature, aerosol, radiative budget, quasi-weekly rhythms, climate models.

Введение

Известно, что атмосферный аэрозоль является одним из климатообразующих компонент атмосферы [1, 2]. В зависимости от размеров частиц

(дисперсности) аэрозоль делят на три класса: дымы (высокодисперсные 0,001 – 0,1 мкм); облака, туманы (среднедисперсные 0,1 – 10 мкм); пыль (грубодисперсные, размеры частиц которых более 10 мкм) [3].

Радиационный бюджет атмосферы во многом зависит от концентрации аэрозольных частиц, которые имеют свойство рассеивать и поглощать солнечную и тепловую радиацию [4], а также воздействуют на микроструктуру обла-

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович – м.н.с., m.s.vasiliev@ikfia.sbras.ru; НИКОЛАШКИН Семен Викторович – к.ф.-м.н., зав. лаб., nikolashkin@ikfia.sbras.ru.

17. <http://rp5.ru/docs/about/ru>.
 18. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf>.
 19. Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109, D03102, doi:10.1029/2003JD003404.
 20. Araguás-Araguás L., Froehlich K., Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103(D22). – P. 28721–28742.
 21. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геохронологии и гляциологии. – М.:

Изд-во МГУ, 2000. – 616 с.

22. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
 23. Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism / Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, San Antonio / Taylor H. P., O'Neil J. R. and Kaplan I. R. (Eds), 1991. – P. 211–221.
 24. Hou S.G., Wang Y.T., Pang H.X. Climatology of stable isotopes in Antarctic snow and ice: Current status and prospects // Chin Sci Bull. – 2013. – Vol. 58. – P. 1095–1106, doi: 10.1007/s11434-012-5543-y.

Поступила в редакцию 20.05.2015

УДК 551.52; 551.593

Температурный эффект аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии

М.С. Васильев, С.В. Николашкин

Институт космических исследований и аэронавтики СО РАН, г. Якутск

Приводятся результаты исследования температурного эффекта аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг. Используются данные натурных и спутниковых измерений, а также климатических моделей NCEP/NCAR и ERA-Interim на основе тех же измерений. Данные по аэрозольному содержанию и распределению по размерам частиц получены по измерениям на солнечном фотометре CE-318 сети «AERONET» около Якутска. Впервые показано, что возмущение атмосферы аэрозольными частицами от воздействия очагов возгорания лесного массива приводит к снижению потока прямой солнечной радиации и при наличии отрицательной фазы уходящей длинноволновой наблюдается понижение приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: приземная температура воздуха, аэрозоль, радиационный бюджет, квазинедельные ритмы, климатические модели.

The results of an investigation of temperature effect of aerosol in the summer season over the central part of Yakutia during the period 2004–2014 are presented. The data of ground-based and satellite measurements and also of climate models NCEP/NCAR and ERA-Interim, which are based on the same measurements. Aerosol depth and particle size distribution data are obtained using «AERONET» CE-318 sunphotometer near Yakutsk. It is first time showed that a disturbance of the atmosphere by aerosol particles which is caused by forest fires area lead to a decrease of direct solar radiation flow and in an additional presence of a negative phase of upward longwave one, a surface air temperature decreasing is observed.

Key words: surface air temperature, aerosol, radiative budget, quasi-weekly rhythms, climate models.

Введение

Известно, что атмосферный аэрозоль является одним из климатообразующих компонент атмосферы [1, 2]. В зависимости от размеров частиц

(дисперсности) аэрозоль делят на три класса: дымы (высокодисперсные 0,001 – 0,1 мкм); облака, туманы (среднедисперсные 0,1 – 10 мкм); пыль (грубодисперсные, размеры частиц которых более 10 мкм) [3].

Радиационный бюджет атмосферы во многом зависит от концентрации аэрозольных частиц, которые имеют свойство рассеивать и поглощать солнечную и тепловую радиацию [4], а также воздействуют на микроструктуру обла-

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович – м.н.с., m.s.vasiliev@ikfia.sbras.ru; НИКОЛАШКИН Семен Викторович – к.ф.-м.н., зав. лаб., nikolashkin@ikfia.sbras.ru.

ков, процессы их образования, выпадение осадков и т.д. [5–7]. В свою очередь известно, что среди внешних факторов, регулирующих суточную амплитуду приземной температуры воздуха (ПТВ), солнечная радиация играет едва ли не первостепенную роль. Связано это с изменением величины приходящей солнечной радиации и уходящей в течение суток. Таким образом, можно предположить, что помутнение прозрачности атмосферы при высокой концентрации аэрозоля может привести к спаду или росту суточной ПТВ. Например, в работе [8] проведены исследования температурного эффекта пылевого аэрозоля в период пылевой мглы над юго-восточной частью Центральной Азии. Пыльные бури и мгла являются существенным метеорологическим фактором данного региона. Автором [8] установлено, что мощные пылевые бури приводят к резкому понижению дневной температуры воздуха и некоторому повышению ночной. В целом наблюдается снижение ПТВ.

В настоящей работе ставится цель исследования температурного эффекта аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии.

Материалы исследования

В работе были использованы среднесуточные значения ПТВ (°С, ст. Якутск) за период июнь–август 2004–2014 гг. – данные ФГБУ «ВНИИГ-МИ-МЦД» (<http://www.meteo.ru>), а также параметры оптических свойств атмосферы, таких как аэрозольная оптическая толщина (АОТ – уровень 2, τ_{500}), параметр Ангстрема ($\tau_{500-870}$) и содержание водяного пара H_2O (см), которые получены с помощью солнечного фотометра CIMEL CE-318 (61.662° с.ш., 129.367° в.д.), входящего в сеть «AERONET», расположенного на полигоне ИКФИА СО РАН в 50 км к югу от Якутска в степной долине р. Лены [9, 10]. АОТ – это безразмерная величина, которая характеризует ослабление интенсивности светового потока при прохождении через атмосферный аэрозоль. Солнечный фотометр CE-318 измеряет прямую солнечную радиацию на 8 длинах волн видимого спектра: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020, 1640 нм. Суммарная ошибка измерения спектральной АОТ изменяется от $\pm 0,01$ до $\pm 0,02$ и спектрально зависит от больших ошибок в ультрафиолетовой области спектра (длина волны от 10 до 400 нм) [11].

Использование наземных экспериментальных данных обусловлено с точки зрения того, что спутниковые данные о влиянии аэрозолей на климат оказались недостоверными: их «холодильный» эффект занижен в 3–6 раз [12]. Авторы работы [12] считают, что спутниковые данные в этом случае недостоверны и могут ис-

пользоваться только в связке с глобальными климатическими моделями. В связи с чем дополнительно были привлечены данные климатических моделей (реанализ) NCEP/NCAR и ERA-Interim [13, 14]: нисходящий поток солнечной радиации (НПСР – коротковолновая радиация, Вт/м²), уходящая длинноволновая радиация (УДР, Вт/м²), ПТВ (Кельвин, с последующим преобразованием в градус Цельсия) и H_2O (кг/м²). С дополнительным описанием данных реанализов и их применением в области исследования ПТВ над регионом центра Восточной Сибири (Якутия) можно ознакомиться в работах [15, 16].

Данные по содержанию концентрации в атмосфере двуокиси углерода (CO_2 , млн.⁻¹) получены с помощью ИК-зонда AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), установленного на борту спутника EOS/Aqua (НАСА, запущен в 2002 г.) [17] (данные находятся в свободном доступе в виде файлов HDF формата (<https://climatedata-guide.usa.gov/>)). В работе [18] показана пригодность результатов спутникового мониторинга тропосферной концентрации атмосферного CO_2 с приемлемой точностью относительной погрешности порядка 1 % над районами бореальных экосистем Сибири.

Результаты и обсуждение

Данные АОТ в различные периоды имеют многочисленные пропуски наблюдения в определенные дни, однако, несмотря на это, без исключения были рассчитаны коэффициенты корреляции со значениями ПТВ. Дни с отсутствием данных наблюдения, в частности, в августе, связаны, скорее всего, с тем, что измеряемые параметры с использованием высокого доверительного уровня 2 свидетельствуют о недостаточности проводимой процедуры и о сравнительно частом наличии облаков и дней с осадками [19, 20]. Предварительные результаты исследования [21, 22] показали, что между данными ПТВ и АОТ (в основном это высокодисперсные аэрозольные частицы, имеющие размер, не превышающий 0,003 мкм) наблюдается неоднозначная картина взаимосвязи или ее отсутствие. Преимущественно корреляционная взаимосвязь положительна, что говорит об отсутствии существенного влияния аэрозольного помутнения атмосферы на радиационный бюджет и ПТВ. Однако известно, что территория Якутии является одним из пожароопасных регионов в Северной Азии с максимумом очагов возгорания в летние месяцы [23]. Данный источник выброса в атмосферу продуктов горения лесного массива, сопровождающийся фотохимическим смогом (дым), вероятней всего является основным

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ АЭРОЗОЛЯ В ЛЕТНИЙ СЕЗОН НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТЬЮ ЯКУТИИ

фактором увеличения АОТ в регионе, что вызывает понижение прозрачности атмосферы и, следовательно, антикорреляционную связь АОТ и ПТВ, как например, в августе 2010 г. ($R=-0,285$) и июле 2005 г. ($R=-0,368$) с уровнем значимости 99 % при $r_{крит}=0,45$. В июне за весь период исследования наблюдалась положительная корреляционная связь АОТ и ПТВ.

На рис. 1 для примера представлены используемые параметры в работе для двух периодов со схожей картиной временных вариаций АОТ в июле 2005 г. и июне 2011 г. (АОТ & ПТВ $R=0,4$). Периоды отличаются тем, что в первом случае при наличии аэрозольного помутнения атмосферы наблюдается понижение ПТВ. Из рис. 1, а видно, что в июле 2005 г. отмечается резкий рост значений АОТ на 11–13-е сутки свыше 0,5 (превышение составило ~ 14 %) от-

носительно среднего фонового значения 1–10 июля порядка 0,08 с последующим спадом и восстановлением абсолютных значений на 16–18-е сутки. По нашему мнению, причиной резкого увеличения абсолютных значений АОТ с 11–13 июля 2005 г. стал фотохимический смог, образовавшийся от очагов возгорания лесного массива на территории Якутии (рис. 2). Возможно, это и стало основной причиной резкого падения НПСР (например, по данным NCEP/NCAR – 205 Вт/м² относительно среднего фонового значения 317 Вт/м², что примерно составило 65 %, а по наземным ~ 24 %), вследствие чего на 12-е сутки наблюдается понижение ПТВ примерно до 12 °С (ст. Якутск, ERA-Interim) относительно среднего фонового значения ~ 21,5 °С. При этом аналогично [8] наблюдается небольшой рост ПТВ в ночное время,

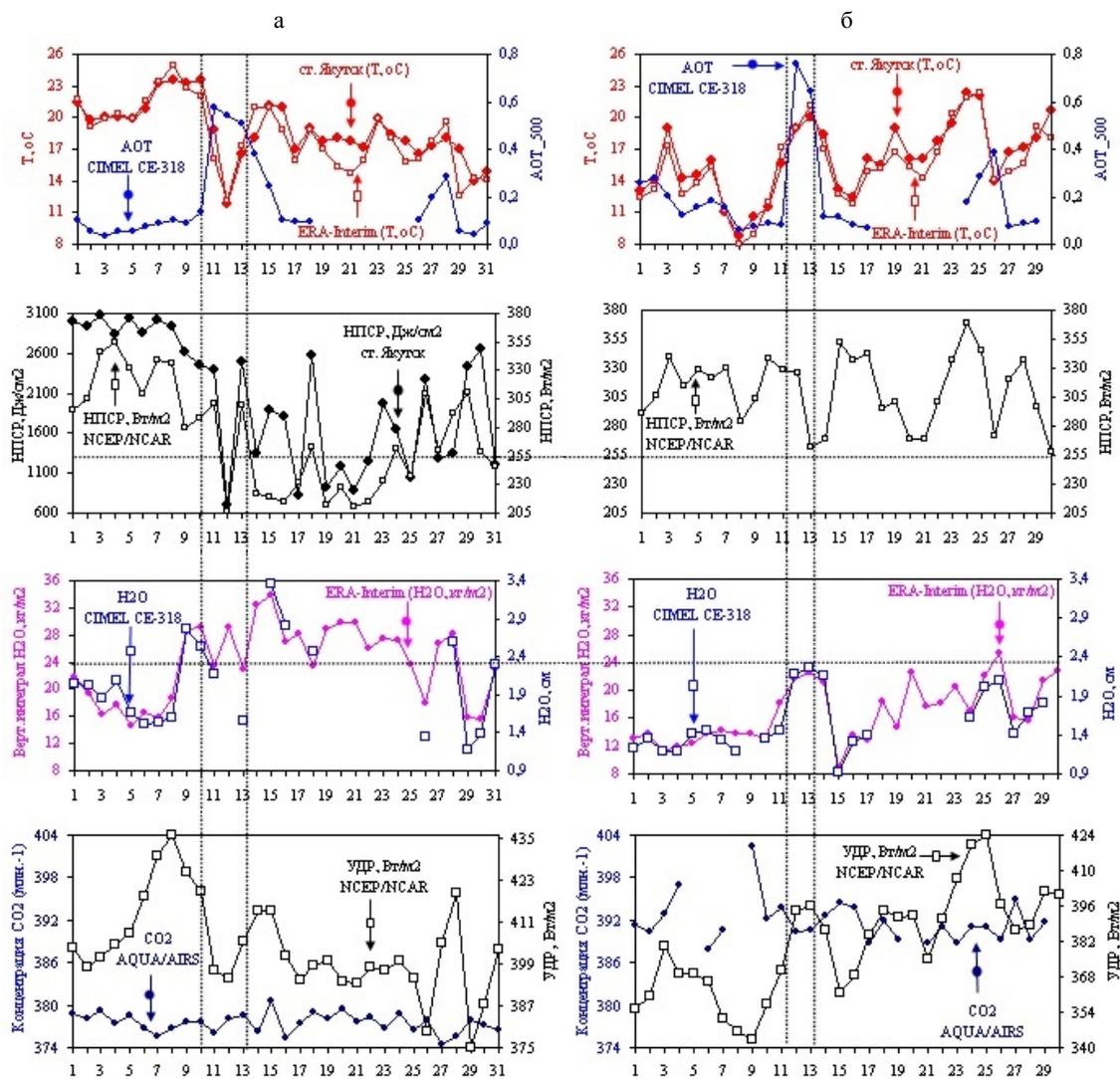


Рис. 1. Среднесуточные вариации ПТВ, АОТ, НПСР, УДР, H₂O и CO₂ в июле 2005 г. (а) и июне 2011 г. (б)

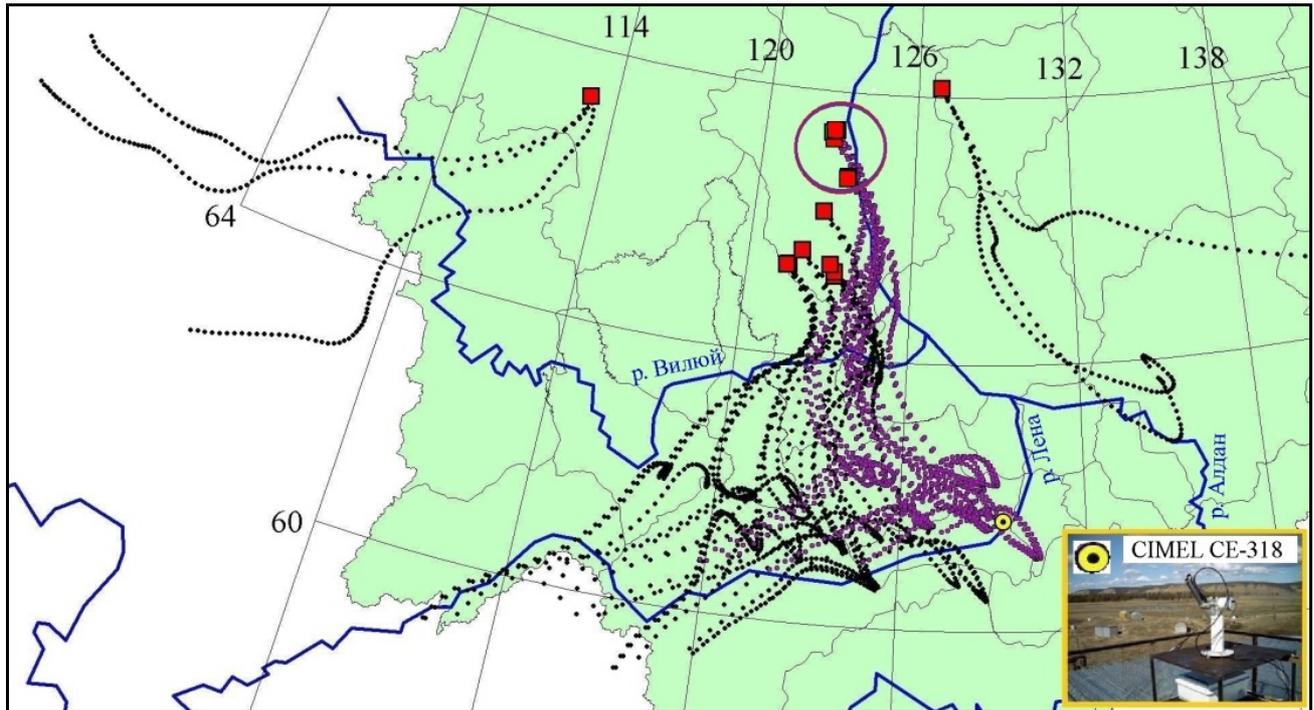


Рис. 2. Траектории распределения воздушных масс фотохимического смога (дымы) на высотах 0, 500 и 1000 м (точки черного и фиолетового цвета) по данным модели HYSPLIT [26] от очагов лесных пожаров (данные AVHRR/NOAA [23] – квадраты красного цвета) за период 11–13 июля 2005 г. Сплошным красным кругом отмечена зона очагов пожаров, траектории смога которых непосредственно охватили местоположение фотометра CIMEL CE-318. Сплошные синие линии – основные элементы гидрографии

примерно на 2 °С. Например, в [24] описано понижение ПТВ в дневное время с одновременным уменьшением НПСР на 20–30 % при переносе облаков пыли из Сахары в Нигерию.

Данные ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 0,125° x 0,125° вокруг фотометра привлечены в связи с тем, что нахождение метеостанции Якутск (расстояние до фотометра CIMEL CE-318 ~ 50 км) может исказить реальную картину влияния АОТ на среднесуточные вариации ПТВ. Влиянием такого проявления может оказаться так называемый «городской остров тепла», который является отражением суммы микроклиматических изменений, связанный с антропогенным преобразованием городской поверхности [25]. Однако видно, что абсолютные значения ПТВ (ст. Якутск, ERA-Interim) и их функции аппроксимации практически схожи, за исключением явных амплитудных различий в определенные дни.

Схожая картина временных вариаций АОТ и ее причины возмущения 12–13 июня наблюдаются в 2011 г. (рис. 1, б). Однако в этот период аэрозольного помутнения атмосферы отмечается противоположный эффект, предположительно «парниковый» – возрастание ПТВ.

Существенного спада НПСР во время возмущения АОТ в июне 2011 г. относительно фоно-

вых значений не наблюдается. Уровень содержания водяного пара в обоих случаях 11–13 июля и 12–13 июня практически одинаков, однако, в июне 2011 г. отмечается превышение средней концентрации CO₂ на 96 % относительно июля 2005 г. Значение таких составляющих, как CO₂, H₂O и др., связано с поглощением и излучением ими инфракрасной радиации, что приводит к возникновению парникового эффекта [27]. Парниковый эффект водяного пара усиливается углекислым газом, который всегда содержится в атмосфере в результате естественного круговорота углерода в природе.

Также можно отметить, что в обоих случаях наблюдаются квазинедельные ритмы вариаций УДР с фазами роста и спада, в связи с чем нами проведены спектральные анализы Фурье (рис. 3). Из рис. 3 и встроенного графика в правом верхнем углу видно, что отмечается диапазон всплесков спектральной плотности значений УДР, соответствующий периоду квазидвухлетних колебаний от 5 до 8 дней, а также пик вблизи максимальных значений в разные годы на частоте 0,13, соответствующий периоду 7,5 дней. Схожая картина колебаний УДР наблюдается в июле и августе. Такие ритмы колебания УДР во многом могут зависеть от квазинедельных ритмов приливных сил [28, 29], обуславли-

вающих появление своего рода микросезонов погоды – естественных синоптических периодов (ЕСП), открытых Б.П. Мультиановским [30] в 1915 г. Смены ЕСП совпадают с экстремумами приливных колебаний скорости вращения Земли.

Исходя из рис. 1–3 и вышеописанного, можно говорить о том, что в исследуемом регионе активность лесных пожаров способна привести к аэрозольному помутнению атмосферы. При этом АОТ является существенным фактором, препятствующим проникновению солнечного света. Наряду с этим возмущение атмосферы аэрозольными частицами при наблюдаемой отрицательной фазе УДР может привести к понижению среднесуточных вариаций ПТВ. Связано это с тем, что УДР, обеспечивающая понижение температуры воздуха в ночное время за счет излучения тепла Земли при наблюдаемой отрицательной фазе, хотя и увеличивает температуру в ночное время, но в связи с отсутствием существенного притока солнечной энергии в дневное время наблюдается общее ее понижение.

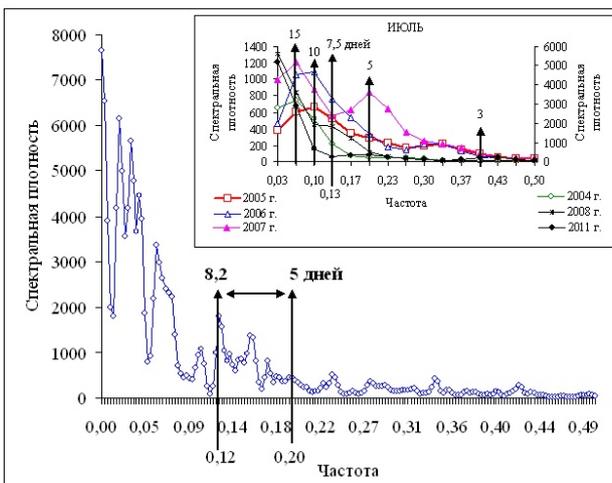


Рис. 3. Спектральный анализ средних среднесуточных значений УДР (NCEP/NCAR) за июль 2004–2014 гг. В верхнем правом углу дополнительно отображен график спектрального анализа среднесуточных значений УДР за июль в различные годы. На графиках по горизонтальным осям отображена частота, соответствующая определенным периодам (сут)

Выводы

В работе на примере двух событий показано, что в летний сезон над центральной частью Якутии взаимосвязь АОТ и ПТВ проявляется по-разному. Помутнение атмосферы аэрозольными частицами очагов возгорания лесного массива способно привести к снижению потока прямой солнечной радиации, а при дополни-

тельном наличии отрицательной фазы УДР к понижению среднесуточного значения ПТВ.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-05-05320а, 13-05-01036а.

Литература

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат / К.Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 4. – С. 301–320.
2. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок.
3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие / К.Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 7. – С. 565–575.
3. Чекман И.С. Аэрозоли – дисперсные системы / И.С. Чекман, А.О. Сырская, С.В. Андреева, В.А. Макаров – Х.: Цифровая друкарня № 1. – 2013. – 100 с.
4. Haywood J. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosol: A review / J. Haywood, O. Boucher // Rev. Geophys. – 2000. – V. 38, № 4. – P. 513–543.
5. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds / S. Twomey // J. Atmos. Sci. – 1977. – V. 34, № 7. – P. 1149–1152.
6. Albrecht B. Aerosol, cloud microphysics, and fractional cloudiness / B. Albrecht // Science. – 1989. – V. 245, № 4923. – P. 1227–1230.
7. Johnson B. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus / B. Johnson, K. Shine, P. Forster // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 2004. – V. 130, № 599. – P. 1407–1422.
8. Абдуллаев С.Ф. Комплексные исследования пылевых и газовых примесей в аридных зонах и их влияние на региональный климатический режим в юго-восточной части центральной Азии: Дис. ... д.ф.-м.н.: 25.00.30. – Душанбе, 2014. – 315 с.
9. Holben B.N. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker et. al. // Remote Sensing & Environment. – 1998. – № 66. – P. 1–16.
10. Dubovik O. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky-radiance measurements / O. Dubovik, A. Smirnov, B.N. Holben et. al. // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105, №4. – P. 9791–9806.
11. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под общей ред. С.М. Сакерина. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. – 484 с. + вкл.

12. Penner J.E. Satellite methods underestimate indirect climate forcing by aerosols / J.E. Penner, L. Xu, M. Wang // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – V.108. – Issue 33. – P.13404–13408, doi: 10.1073/pnas.1018526108.
13. Kistler R. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation / R. Kistler, E. Kalnay, W. Collins et. el. // Bull. Amer. Met. Soc. – 2001. – V. 82, № 2. – P. 247–267.
14. ECMWF Newsletter No. 110 – Winter 2006/07 / Riddaway B. (ed.) Reading: European Center for Medium-Range Weather Forecast. – 2007. – P. 53.
15. Васильев М.С. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, Р.Р. Каримов // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 11, № 5. – С. 82–88.
16. Васильев М.С. Временная изменчивость приземной температуры воздуха в Якутии во время крупных Форбуш-понижений / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, Р.Р. Каримов // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 11, № 6. – С. 19–29.
17. Chahine M. On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO₂ / M. Chahine, C. Barnet et. el. // Geophys. Res. Lett. – 200. – 32. – L22803, doi: 10.1029/2005GL024165.
18. Кухарский А.В. Определение средней концентрации атмосферного диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения / А.В. Кухарский, А.Б. Успенский // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 4. – С. 15–28.
19. Матющенко Ю.Я. Малоугловые аэрозольные и облачные образования на фоне преобладающе безоблачной атмосферы / Ю.Я. Матющенко, В.Е. Павлов // Межрегиональный экологический форум: Сб. мат. форума. – Барнаул, 2004. – С. 138–141.
20. Павлов В.Е. Отбор безоблачных ситуаций по данным AERONET / В.Е. Павлов, П.М. Зацепин, Ю.Я. Матющенко // XI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2004. – С. 17.
21. Васильев М.С. Взаимосвязь вариаций температуры воздуха и содержания аэрозоля в центральной Якутии в летнее время / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, А.А. Решетников, С.В. Титов / Аэрозоли Сибири. XXI Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – С. 57.
22. Васильев М.С. Влияние аэрозоля на температуру воздуха в летний сезон над центральной частью Якутии / М.С. Васильев, С.В. Николашкин / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXI Межд. симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: ИОА СО РАН, 2015. – в печати.
23. Васильев М.С. Исследование возможных причин возникновения лесных пожаров в Якутии по данным дистанционных наблюдений / М.С. Васильев, Р.Р. Каримов // В мире научных открытий. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. – № 4 (52). – С. 161–171.
24. Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля / Под ред. Г.С. Голицына – СПб.: НПО «Тайфун», 1992. – 208 с.
25. Oke T.P. Климаты пограничного слоя / Т.Р. Оке. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 359 с.
26. Draxler R.R. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) / R.R. Draxler, G.D. Rolph / Model access via NOAA ARL READY Website: <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. – NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. – 1997.
27. Bach W. Carbon dioxide: Current Views and Developments in Energy / W. Bach, A.J. Crane // Climate Res. – 1982. – P. 16.
28. Сидоренко Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли / Н.С. Сидоренко. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 366 с.
29. Сидоренко Н.С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы / Н.С. Сидоренко // Природа. – 2008. – № 2. – С. 23–31.
30. Мультиановский Б.П. Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды / Б.П. Мультиановский – М.: изд. ЦУЕГМС, 1933. – 139 с.

Поступила в редакцию 29.05.2015

Резонансные проявления в грозовых электромагнитных сигналах

А.А. Торопов, В.А. Муллаяров

Институт космических исследований и астрономии СО РАН, г. Якутск

На основе экспериментальных данных наблюдений низкочастотных радиоизлучений, полученных в окрестностях г. Якутска и п. Батагая, рассмотрены резонансные эффекты в электромагнитных сигналах грозовых разрядов. Эффекты имеют частоты, лежащие ниже критической частоты поперечного резонанса «земля–ионосфера». Особо выделяются эффекты в виде «полос» (квазипериодических излучений), зарегистрированные, в основном, в окрестности п. Батагая. Основная резонансная частота эффектов составляла около 145 Гц, добротность колебаний – около 10 Гц. Полученное по сигналам с верхним частотным «срезом» распределение возможных критических частот показывает достаточно широкий диапазон частот с максимумом событий на 700–800 Гц. В диапазоне 350–600 Гц отмечается совпадение частот разных типов резонансных проявлений: полос, «колен» (дисперсия вверх и вниз от резонансной частоты) и сигналов с верхним частотным «срезом». В качестве возможного волновода, в котором проявляются указанные резонансные эффекты, предполагается волновод, образованный слоями ионосферы.

Ключевые слова: грозовые электромагнитные сигналы, волноводы, резонансы, распространение сигналов, ионосфера.

On the basis of experimental data of observations of low-frequency radio emissions carried out in the vicinity of Yakutsk city and Batagai settlement the resonant effects of lightning electromagnetic signals are considered. The effects have frequencies which are below the critical frequency of transverse resonance of the «earth–ionosphere» waveguide. The effects in the form of «bands» (quasi-periodic emissions) registered mostly in the vicinity of Batagai were standing out. The main resonance frequency of the effects was about 145 Hz, and Q-factor was about 10. The distribution of possible critical frequencies obtained on the basis of the signals with upper frequency «cut-off» reveals a fairly wide range of frequencies, with maximum events at 700–800 Hz. In the range of 350–600 Hz it is observed the coincidence of frequencies of different types of the resonant effects: bands, «knees» (dispersion upwards and downwards from the resonant frequency) and signals with upper frequency «cut-off». The waveguide formed by the layers of the ionosphere is proposed as a possible waveguide, in which these resonance effects are manifested.

Key words: storm electromagnetic signals, waveguides, resonances, distribution of signals, ionosphere.

Введение

Низкочастотные ($f < 30$ кГц) радиосигналы за счет слабого затухания при распространении в волноводе «земля–ионосфера» используются в дистанционном мониторинге процессов и структур в верхней атмосфере–ионосфере. Это, прежде всего, сигналы радиостанций СДВ диапазона, используемые для диагностики процессов в ионосфере во время солнечных вспышек, высыпания заряженных энергичных частиц из радиационных поясов и обнаружения ионосферных возмущений, обусловленных сейсмическими процессами (см., например, [4,6,9,10]). Наряду с радиосигналами

привлекаются и естественные электромагнитные излучения в диапазоне очень низких частот (ОНЧ, $f < 30$ кГц). Широко известным таким излучением является электромагнитное излучение грозовых разрядов (атмосферики), которое, прежде всего, используется для мониторинга грозовой активности (определение местоположения грозовых разрядов). Для целей такой пассивной грозолокации применяются как однопунктовые, так и многопунктовые системы (например, мировая распределенная система WWLLN [12]). В работах [3,8] эти сигналы предложено использовать для дистанционного обнаружения сейсмических ионосферных возмущений (эффектов землетрясений и их возможных предвестников).

Поскольку грозовые сигналы распространяются в волноводе («земля–ионосфера»), то в их характеристиках, естественно, проявляются резонансные

ТОРОПОВ Анатолий Анатольевич – м.н.с., mullayarov@ikfia.yasn.ru; МУЛЛАЯРОВ Виктор Арсланович – к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лаб., mullayarov@ikfia.yasn.ru.

свойства данного волновода – наличие критической частоты около 1,7 кГц (определяется высотой верхней стенки волновода – высотой нижней ионосферы). В окрестности этой резонансной частоты происходит сильное затухание сигналов и могут наблюдаться специфические (сильно диспергированные) сигналы – так называемые «твики» [1, 2]. Данные особенности сигналов изучены достаточно хорошо. В то же время обнаружены и другие типы резонансных проявлений в электромагнитных сигналах, связанных с грозовыми процессами [7], которые пока не обсуждаются (слабо обсуждаются). В данной работе рассматриваются особенности таких резонансных проявлений в характеристиках грозовых электромагнитных излучений.

Аппаратура и методика измерений

Основные записи сигналов осуществляются с помощью многокомпонентного приемно-измерительного комплекса вблизи г. Якутска, в котором используется антенная система, состоящая из двух ортогональных рамок для приема магнитной составляющей сигналов и вертикального штыря для приема электрической составляющей.

Сигналы, снимаемые с антенн, усиливаются в предварительном усилителе и через линии связи поступают на оконечные усилители, находящиеся в помещении. После дополнительного усиления сигналы оцифровываются с помощью 14-разрядных аналого-цифровых преобразователей типа E-440 и вводятся в персональный компьютер.

Обычно реализации сигналов записываются в синоптическом режиме (периодически) с временным разрешением 10 мкс или, соответственно, с частотой 100 кГц/канал. Следовательно, цифровой спектральный анализ может быть проведен в частотной полосе до 50 кГц, хотя приемные тракты имеют частотную характеристику с ослаблением сигнала на частотах выше 10 кГц.

Также используется мобильный приемный комплекс, регистрирующий, как правило, одну (электрическую) компоненту электромагнитного поля. С помощью такого комплекса были произведены записи сигналов с ранее неизвестными резонансными проявлениями в окрестности п. Батагай.

Для получения статистических характеристик резонансных проявлений в грозовых сигналах проведен спектральный анализ и анализ волновых форм сигналов, зарегистрированных в 2014 г. Спектральный анализ осуществлялся с использованием программного продукта Sonic Visualiser или Sound Forge. По полученным спектрограммам выделялись резонансные проявления в сигналах с определением возможных критических частот.

Результаты

Наиболее известным и наиболее изученным типом ОНЧ сигнала, в котором проявляются резонансные свойства волновода «земля–ионосфера», является атмосферик с низкочастотным «хвостом» («твиком»). Пример записи волновой формы данного сигнала, зарегистрированного в г. Якутске на полигоне ИКФИА, представлен на рис. 1, а. Твик, начавшийся на 7887 мс от начала записи, на рисунке выражен в виде квазипериодических затухающих колебаний длительностью около 50 мс. На 17 мс от начала твика наложился второй, существенно более слабый твик.

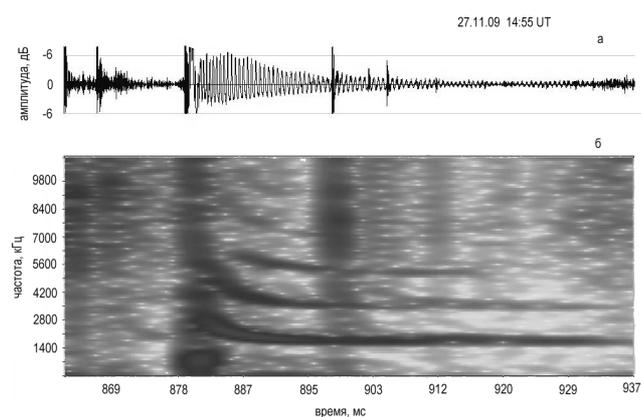


Рис.1. Пример записи волновой формы (а) и спектра (б) твика, записанного 27.11.09

Атмосферики, вызвавшие твики, представлены в виде вертикальных линий из-за недостаточной временной развертки. Спектрограмма данного твика представлена на рис. 1, б. Твик содержит 5 гармоник основной частоты 1,7 кГц (критической частоты поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера»). Спектр атмосферика на частотах ниже критической частоты имеет затухание. На спектрограмме также виден более слабый атмосферик, твик которого наложился на первый твик.

В ходе анализа спектрограмм выявлены различные резонансные проявления в сигналах на частотах ниже поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера», такие как: «колена» с дисперсией, «полосы» излучения и сигналы с верхней частотной отсечкой (рис. 2, а).

На рис. 2, б представлены «недоразвитые твики» – по сути это часть «твика» вследствие того, что «твик» испытал сильное затухание в процессе распространения в волноводе. На рис. 2, а атмосферерики вызвали полные твики. Эти же атмосферерики имеют другой тип резонансных проявлений в виде «колен», сформированных дисперсией сигналов в области частот 805 Гц и 405 Гц. Так же присутствует резонансное проявление в виде «полосы» на частоте 570 Гц,

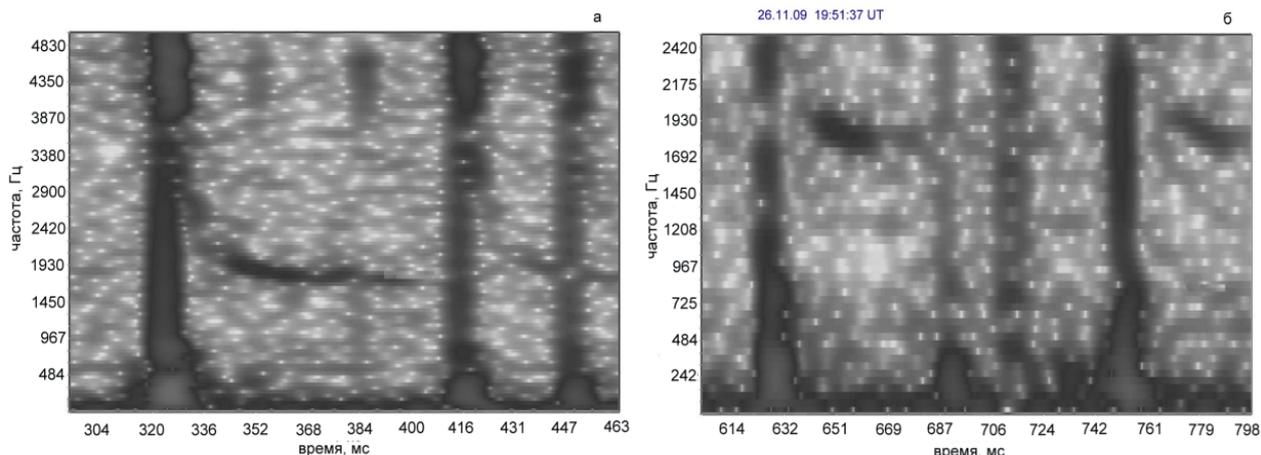


Рис.2. Различные виды резонансных проявлений в грозовых сигналах на частотах ниже поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера».

которая также выражена на рис. 2, б. Частота полосы соответствует частоте «среза» и центральной частоте «колена».

Такие резонансные проявления указывают, что кроме известных на данный момент резонансных характеристик волновода «земля–ионосфера» имеются и другие резонансные структуры, проявляющиеся в ОНЧ сигналах.

Кроме рассмотренных резонансных проявлений в КНЧ сигналах ($f < 3$ кГц) в виде «твиков», «колен», «полос» были также выявлены квазипериодические резонансные сигналы. Эти сигналы обнаружены в записях КНЧ–ОНЧ сигналов, сделанных в августе 2008 г. Эпизодические записи электромагнитных сигналов грозовых разрядов осуществлялись в период 21–23.08.08 в Верхоянье, недалеко от п. Батагай в основном в часы максимальной грозовой активности. Запись производилась с электрической антенны высотой 10 м через усилитель на компьютер с частотой оцифровки 62,5 кГц. Условия записи были благоприятны с точки зрения отсутствия каких-либо сетевых и промышленных помех. Наблюдения проводились на высотах ~ 450 м над уровнем моря.

На записи, сделанной 23.08.08 в 10:22 UT (рис. 3, а), мы видим примеры квазипериодических КНЧ излучений на 200 мс, на 700 мс и в интервале 1200–1600 мс от начала записи. Более детально последний случай приведен на рис. 3, б. По спектрограмме записи видно, что квазипериодические КНЧ излучения в виде «полос» содержат гармоники (до 5-й гармоники). По спектру на рис. 5 видно, что основная гармоника приходится на частоту 145 Гц, что в волновой форме соответствует периоду 7 мс. Из одного из определений добротности, основанном на отношении центральной частоты (резонансная частота) к полосе излучения, она составила около 10 мс.

В приведенном примере возбуждение квазипериодических резонансных излучений происходило двумя способами: в виде ударного возбуждения (первые два события: 200 мс, 700 мс) и в виде длительных колебаний (третье событие). При этом и гашение длительных колебаний произошло в момент КНЧ импульсов. Таким образом, возбуждение некоего резонанса могло вызываться КНЧ атмосфериком и заканчиваться (гаситься) таким же сигналом.

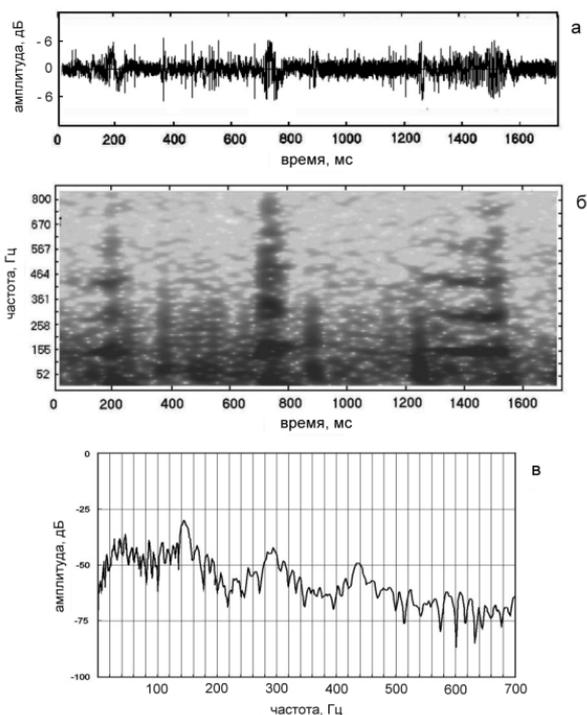


Рис. 3. Примеры квазипериодических КНЧ излучений, зарегистрированных 23.08.08 в 10:22 UT: на 200 мс, на 700 мс и в интервале 1200–1600 мс от начала записи (а). На спектрах (б, в) – основная резонансная частота около 145 Гц.

Пример резонансных проявлений, приведенный на рис. 4 для события 22.08.08 в 23:27 UT, примечателен тем, что квазипериодические излучения, начинающиеся с КНЧ атмосфера (все гармоники), в явном виде тесно связаны с другим типом резонансного проявления типа «колена» – с сигналами с дисперсией. Так же видны импульсные сигналы с верхним частотным срезом, соответствующим основной гармонике.

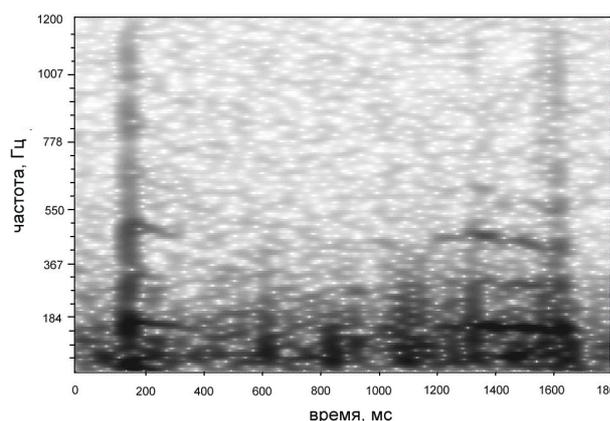


Рис.4. Пример излучений с соответствием частот у различных типов резонансных проявлений

Для получения статистических характеристик резонансных проявлений в виде излучений с «верхним частотным срезом» были выборочно проанализированы записи сигналов в течение 22 дней за лето 2014 г. с повышенной грозовой активностью в интервале с 11:00 до 21:00 UT, что соответствует интервалу от 20:00 до 06:00 ч по местному времени (ночное время).

Использованы спектрограммы, пример которых приведен на рис. 5, а (запись сигнала длительностью 10 с произведена 10 июня 2014 г. в 15:00 UT). Кружком отмечен сигнал с верхним частотным срезом. Статистический анализ таких резонансных проявлений показал, что вероятность их наблюдения составляет менее 1% от числа атмосфериков.

Для определения резонансных (критических) частот возможных волноводов, определяемых по сигналам с частотным срезом, построено их частотное распределение, представленное на рис. 5, б. В диапазоне до критической частоты волновода «земля–ионосфера» максимальная вероятность наблюдения данных сигналов приходится на сигналы с верхней частотой около 700 Гц. По-видимому, в распределении можно выделить еще и низкочастотный максимум (550–600 Гц). Погрешность, которая составляет ~50 Гц, не столь значительно влияет на распределение при таком диапазоне предполагаемых резонансных частот. Отсутствие выраженного

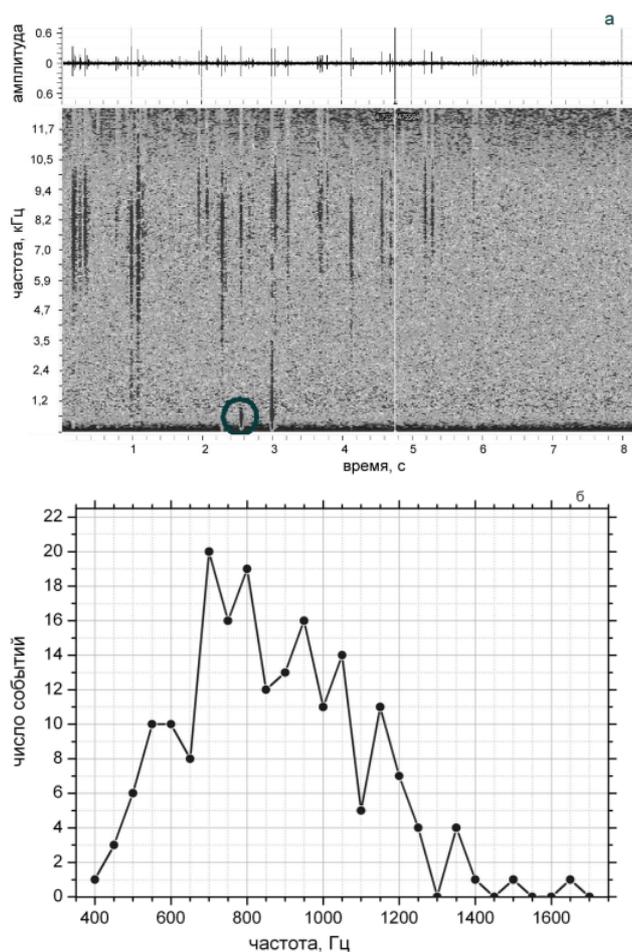


Рис. 5. Пример излучений с «верхним частотным срезом» (а) и распределение вероятности их наблюдения в зависимости от частоты (б)

(узкого) диапазона резонансных частот говорит о том, что если это единственный волновод, то стенки этого волновода подвижны от случая к случаю.

Обсуждение

Как отмечено на рис. 2–4, сигналы с верхней частотной отсечкой имеют ту же верхнюю частоту, что и «колена», и «полосы». Данный факт представляется важным с точки зрения природы этой отсечки. Известно, что при распространении сигналов в волноводе «земля–ионосфера» в их спектре на больших расстояниях от источника формируется глубокий провал в окрестности критической частоты 1,7 кГц. Верхняя граница низкочастотного края этого провала на спектре выглядит именно как у сигналов с верхней частотной отсечкой. Однако совпадение частот верхней отсечки с частотами колена, причем «одномоментно», а также отсутствие (или почти полное отсутствие) верхней, высокочастотной, части у многих сигналов указывают, что сигналы с верхней частотной отсечкой имеют, по-

видимому, еще и другие причины формирования этой отсечки – резонансы, отличные от поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера». Это позволяет рассматривать по крайней мере часть таких сигналов как одно из резонансных проявлений наравне с «коленами» и «полосами».

Проявление некоторых резонансов можно было бы объяснить резонансом в волноводе, сформированным горными системами в Якутии (Верхоянский хребет и хребет Черского, рис. 6, а). Возможность такого резонанса рассмотрена в работе [11]. Однако предполагаемые критические частоты этой системы лежат в пределах 280–320 Гц (расстояния между горными системами, соответствующие половине длины волны, равны 470–530 км), что ниже частот полученного распределения (> 400 Гц) и, наоборот, выше

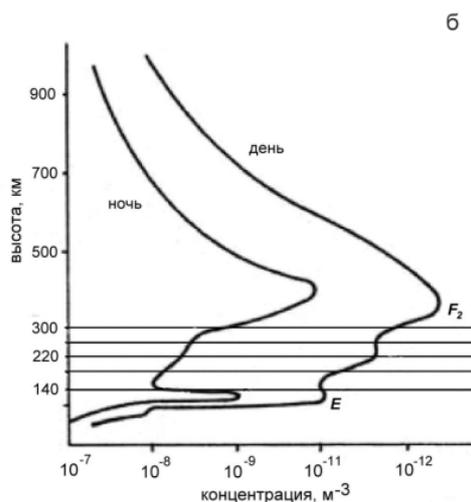


Рис. 6. Возможные размеры волновода, сформированного горными системами в Якутии (а), и возможного волновода, образованного слоями ионосферы (б)

резонансной частоты колебаний, зарегистрированных в августе 2008 г. в окрестности п. Батагай. При этом стенки такого волновода неподвижны и во всех случаях резонансные эффекты должны были бы наблюдаться на одних и тех же частотах. Следовательно, можно полагать, что наблюдаемые резонансные проявления в сигналах являются следствием переменных структур. К числу таких структур можно отнести, например, слои в ионосфере, между которыми возможно образование волноводов.

Предполагается, что волны проникают в ионосферу и могут захватываться возможными волноводами, образованными слоями ионосферы. Принимая во внимание, что коэффициент преломления в ионосфере (ночью) для сигналов КНЧ диапазона порядка 10 [5], длина волны в возможном волноводе во столько же раз меньше. Тогда высота волновода для критической частоты 700 Гц должна быть порядка 21,4 км, а для частоты 145 Гц – 103,4 км.

Для профиля электронной концентрации в ионосфере, приведенного для примера на рис. 6, б, видно, что в ночное время (левый профиль) существование волновода возможно на высотах 140–300 км (повышенная концентрация на границах указанного диапазона высот, которая служит стенками возможного волновода). Верхняя стенка волновода изменяется с высотой по сравнению с нижней стенкой (на 140 км), что может быть одной из причин, объясняющей широкий диапазон возможных критических частот. Следует так же учесть, что с изменением электронной концентрации в течение ночи меняется и резонансная частота. Оценочные размеры волновода в интервале 20 км и 105 км вполне соответствуют интервалу возможных размеров (от 140 км до 300 км).

Выводы

На основе экспериментальных данных наблюдений низкочастотных радиоизлучений, полученных в окрестностях г. Якутска и п. Батагай, рассмотрены резонансные эффекты в сигналах: «колена» с дисперсией, «полосы», сигналы с верхней частотной отсечкой. Эффекты имеют частоты, лежащие ниже критической частоты поперечного резонанса «земля–ионосфера» (1,7 кГц).

Особо выделяются «полосы» (в виде длительных квазипериодических излучений), зарегистрированные, в основном, в окрестности п. Батагай, основная резонансная частота которых составляет около 145 Гц, добротность колебаний – около 10 Гц.

Распределение возможных критических частот по сигналам с верхним частотным «срезом» пока-

зывает, что диапазон частот широк и максимум событий приходится на интервал 700–800 Гц.

По результатам работы сделан вывод о существовании пока не рассматриваемых волноводов, при распространении в которых проявляются указанные резонансные эффекты в сигналах. В качестве возможного волновода предлагается волновод, образованный между слоями ионосферы в ночное время суток.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-45-05005-р_восток_а.

Литература

1. Александров М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ и НЧ-диапазонов и их источников // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №10. – С. 3–25.
2. Едемский Д.Е., Рябов Б.С., Тараненко С.С. и др. Особенности распространения и структура поля твиков // Препринт № 46 (800). – М., 1988.
3. Муллаяров В.А., Абзалетдинова Л.М., Аргунов В.В., Корсаков А.А. Вариации параметров грозových электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 6. – С. 841–851.
4. Clilverd M.A., Nunn D., Lev-Tov S.J. et al. Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, No. A8. – P. SIA 10-1–SIA 10-11.
5. Cummer S.A. and Inan U.S. Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations // Radio Sci. – 2000. – V. 35, №2. – P. 385–394.
6. McRae W.M., Thomson N.R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2004. – V. 66. – P. 77–87.
7. Mullayarov V.A., Kozlov V.I., Toropov A.A., Karimov R.R. Some Results of Observations of Positive Lightning Discharges and Relative Phenomena in the East of Siberia // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2010. – V. 72. – Issue 5–6. – P. 409–418.
8. Mullayarov V.A., Argunov V.V., Abzaletdinova L.M. and Kozlov V.I. Ionospheric effects of earthquakes in Japan in March 2011 obtained from observations of lightning electromagnetic radio signals // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 3181–3190, 2012, doi:10.5194/nhess-12-3181-2012.
9. Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A. Subionospheric VLF monitoring for earthquake-related ionospheric perturbations // J. Atmos. Electr. – 2002. – V. 22. – P. 87–99.
10. Soloviev O.V., Hayakawa M., Ivanov V.I., Molchanov O.A. Seismo-electromagnetic phenomenon in the atmosphere in terms of 3D subionospheric radio wave propagation problem // Phys. Chem. Earth. – 2004. – V. 29. – P. 639–647.
11. Wait J.R. On VLF radio wave reflection from distant mountain ranges – theory // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1992. – V. 54, №2. – P. 193–196.
12. www.wwilln.net.

Поступила в редакцию 30.07.2015

УДК 550.34

Новая карта сеймотектоники Восточной Сибири: принципы и методы построения

В.С. Имаев*, Л.П. Имаева*, Н.Н. Гриб**, И.И. Колодезников***

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

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

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

Карта сеймотектоники Восточной Сибири представляет собой первую попытку объединения разнообразных геолого-геофизических данных, которые характеризуют связь проявлений сейсмичности и тектоники изучаемого регионов Алтая, Тувы, Бурятии и Республики Саха (Якутия). Основными научными достижениями составленной карты являются: структурно-кинематическая иденти-

*ИМАЕВ Валерий Сулейманович – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС(Я), г.н.с., imaev@crust.irk.ru; *ИМАЕВА Людмила Петровна – к.г.-м.н., с.н.с., imaeva@crust.irk.ru; **ГРИБ Николай Николаевич – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зам. директора по научной работе, nfygu@mail.ru; ***КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС (Я), президент, anrsya@mail.ru.

зывает, что диапазон частот широк и максимум событий приходится на интервал 700–800 Гц.

По результатам работы сделан вывод о существовании пока не рассматриваемых волноводов, при распространении в которых проявляются указанные резонансные эффекты в сигналах. В качестве возможного волновода предлагается волновод, образованный между слоями ионосферы в ночное время суток.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-45-05005-р_восток_a.

Литература

1. Александров М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ и НЧ-диапазонов и их источников // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №10. – С. 3–25.
2. Едемский Д.Е., Рябов Б.С., Тараненко С.С. и др. Особенности распространения и структура поля твиков // Препринт № 46 (800). – М., 1988.
3. Муллаяров В.А., Абзалетдинова Л.М., Аргунов В.В., Корсаков А.А. Вариации параметров грозových электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 6. – С. 841–851.
4. Clilverd M.A., Nunn D., Lev-Tov S.J. et al. Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, No. A8. – P. SIA 10-1–SIA 10-11.
5. Cummer S.A. and Inan U.S. Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations // Radio Sci. – 2000. – V. 35, №2. – P. 385–394.
6. McRae W.M., Thomson N.R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2004. – V. 66. – P. 77–87.
7. Mullayarov V.A., Kozlov V.I., Toropov A.A., Karimov R.R. Some Results of Observations of Positive Lightning Discharges and Relative Phenomena in the East of Siberia // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2010. – V. 72. – Issue 5–6. – P. 409–418.
8. Mullayarov V.A., Argunov V.V., Abzaletdinova L.M. and Kozlov V.I. Ionospheric effects of earthquakes in Japan in March 2011 obtained from observations of lightning electromagnetic radio signals // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 3181–3190, 2012, doi:10.5194/nhess-12-3181-2012.
9. Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A. Subionospheric VLF monitoring for earthquake-related ionospheric perturbations // J. Atmos. Electr. – 2002. – V. 22. – P. 87–99.
10. Soloviev O.V., Hayakawa M., Ivanov V.I., Molchanov O.A. Seismo-electromagnetic phenomenon in the atmosphere in terms of 3D subionospheric radio wave propagation problem // Phys. Chem. Earth. – 2004. – V. 29. – P. 639–647.
11. Wait J.R. On VLF radio wave reflection from distant mountain ranges – theory // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1992. – V. 54, №2. – P. 193–196.
12. www.wwilln.net.

Поступила в редакцию 30.07.2015

УДК 550.34

Новая карта сеймотектоники Восточной Сибири: принципы и методы построения

В.С. Имаев*, Л.П. Имаева*, Н.Н. Гриб**, И.И. Колодезников***

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

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

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

Карта сеймотектоники Восточной Сибири представляет собой первую попытку объединения разнообразных геолого-геофизических данных, которые характеризуют связь проявлений сейсмичности и тектоники изучаемого регионов Алтая, Тувы, Бурятии и Республики Саха (Якутия). Основными научными достижениями составленной карты являются: структурно-кинематическая иденти-

*ИМАЕВ Валерий Сулейманович – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС(Я), г.н.с., imaev@crust.irk.ru; *ИМАЕВА Людмила Петровна – к.г.-м.н., с.н.с., imaeva@crust.irk.ru; **ГРИБ Николай Николаевич – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зам. директора по научной работе, nfygu@mail.ru; ***КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС (Я), президент, anrsya@mail.ru.

кация зон возникновения очагов сильных землетрясений наиболее сейсмически активных сегментов Восточной Сибири; создание структурно-динамической модели главных сейсмогенерирующих зон Арктико-Азиатского и Байкало-Станового сейсмических поясов, связанных с зонами взаимодействия Евразийской и Североамериканской литосферных плит и выявление в их пределах потенциальных очаговых зон с максимальным сейсмическим потенциалом. Данные исследования впервые дали объяснение модели возникновения сейсмичности в отдельных сегментах горно-складчатых систем Байкало-Станового и Арктико-Азиатского сейсмических поясов.

Ключевые слова: карта, сеймотектоника, очаги землетрясений, структурно-динамические модели, сейсмогенерирующие зоны, сейсмический потенциал.

The seismotectonic map of Eastern Siberia represents the first attempt to unite various geological-geophysical data that specify the connection between seismicity and tectonics events in the regions of Altai, Tuva, Buryatia and Yakutia. The main scientific achievements of the completed seismotectonic map of Eastern Siberia are structural-kinematic identification of strong earthquake centers zones of the most seismically active Eastern Siberia segments; structural-dynamic modeling of the main seismogenic zones in Arctic-Asian and Baikal-Stanovoi zones connected with the interaction zones of Eurasian and North American lithosphere plates and detection of potentially source zones with maximum seismic potential within their limits. For the first time research data explained the model of seismicity occurrence in separate segments of fold-mountain systems in Baikal-Stanovoi and Arctic-Asian seismic zones.

Key words: map, seismotectonics, earthquake centers, structural-dynamic models, seismogenic zones, seismic potential.

Введение

При проведении многолетних работ по установлению вероятных связей разновозрастных и разнообразных по своей позиции и структурному стилю элементов геологических и тектонических структур горно-складчатых областей территории Восточной Сибири с сейсмической опасностью удалось установить некоторые закономерности в проявлении развития разрывных структур и сейсмичности территории. Исследования подобного рода известны в российской и англоязычной научной литературе как самостоятельные сеймотектонические исследования, главной целью которых являются: «...установление или изучение связи проявлений сейсмичности и тектоники регионов...» [1].

Другое, более развернутое определение сеймотектоники приводится американскими учеными, которые утверждают, что сеймотектоника – «...является научной дисциплиной, изучающей взаимосвязь между землетрясениями, активной тектоникой и отдельными разломами региона... Стремится понять, какие данные несут ответственность за сейсмическую активность в конкретном районе путем анализа региональной тектоники, последних инструментально записанных сейсмических событий, исследований исторических и палеоземлетрясений, а также неотектонических и геоморфологических данных. Эта информация в дальнейшем может быть использована для количественной оценки сейсмической опасности того или иного региона. При проведении сеймотектонического анализа территории требуется интеграция большого количества разнородных геолого-геофизических данных...» (по [2–4]).

Результаты сеймотектонических исследований выражаются обычно в виде сеймотектонических карт, на которые наносятся данные о формах развития неотектонических структур и эпицентральные зоны землетрясений, что позволяет установить связь этих землетрясений с особенностями тектонического (неотектонического) строения местности и использовать эту связь для прогноза места, силы и частоты землетрясений, а также для составления карт сейсмического районирования [5–10].

Отсутствие единого подхода и четкой регламентирующей базы, используемых геолого-геофизических характеристик среды часто не позволяет успешно провести такие сеймотектонические исследования и ставит под сомнение результаты оценки уровня сейсмической опасности, полученные только методом инструментальных наблюдений и не подкрепленные определенными обязательными в настоящее время сеймотектоническими исследованиями. В настоящей статье суммируется многолетний авторский опыт проведения сеймотектонических исследований в разнообразных сегментах сейсмоактивных структур территорий Южной и Восточной Якутии, Алтая, Саян, Тувы и области Байкальской рифтовой зоны, приводятся методические указания и обоснования целесообразности использования выбранных геолого-геофизических показателей для целей создания карты сеймотектоники Восточной Сибири. Как и во всех остальных исследованиях подобного рода, эффективность и достоверность результатов сеймотектонических исследований во многом обеспечивается соблюдением стадийности их проведения, которые проводятся в три этапа.

Стадийность исследований

На первом этапе проводится сбор исходного материала. Собственно исследования включают в себя совместный анализ всех имеющихся материалов по геологическому строению, сейсмическому режиму, неотектонике, истории развития рельефа, глубинному строению, напряженному состоянию и современным движениям земной коры, а также проводится дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли. Иными словами, создается и анализируется материал, являющийся региональной сеймотектонической базой данных.

Второй этап включает более конкретные исследования применительно к проектируемым народнохозяйственным объектам и связан с непосредственным полевым изучением активных разломов. Методика выявления и изучения активных разломов основана на комплексе дистанционных и полевых методов, позволяющих по проявлениям в рельефе и в составе молодых отложений выявить активные разломы, закартировать зоны связанных с ними деформаций и определить тип, амплитуду и среднюю скорость смещений. Следует особо подчеркнуть, что без реальных структурно-геологических и геоморфологических наблюдений непосредственно в полевых условиях никакие дальнейшие обобщения и построения будут неполноценными и недостоверными.

Третий этап (камеральный) подразумевает общую обработку результатов как полевых, так и фондовых и литературных материалов. Результаты обязательного тренчинга используются при этом не только для установления мест пересечения проектируемых объектов с активными разломами, но и для построения сеймотектонической модели.

Задачи и методика сеймотектонических исследований

Основными элементами сеймотектонической модели (карты зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ)) являются источники сейсмических воздействий – площадные (домены), характеризующие рассеянную (фоновую) сейсмичность, и линейные, отражающие сосредоточенную сейсмичность, т.е. потенциальные очаги сильных землетрясений (сейсмолинементы по [11]). Согласно сложившейся сейсмологической практике, в качестве линейных источников рассматриваются активные разломы. Для объяснения доменной сейсмичности предложен новый критерий – геодинамически активные неотектонические зоны (ГАНЗ) [12].

ГАНЗ, с позиции системного анализа, рассматривается как пространственно локализо-

ванный целостный объект с многофакторным взаимодействием его основных компонентов в разрезе земной коры и верхней мантии (литосфере) – корово-мантийный вариант; в разрезе литосферы и нижней мантии – суперглобальный вариант. Классификация ГАНЗ представляет собой систему, состоящую из 10 классов. Каждый из них характеризуется набором признаков: геодинамической обстановкой формирования геологических структур; скоростями горизонтального (по данным GPS и геологическим и геоморфологическим данным) и вертикального движения геологических тел (мм/год); размерами их пластических (пликативных) и разрывных деформаций; направлениями силовых тектонических полей; морфоструктурными типами эндогенного рельефа суши и морей, их высотами и значениями контрастности; геофизическими (величины теплового потока и поля силы тяжести, сейсмической томографии, глубинного строения: мощность земной коры, глубина залегания поверхности Мохоровичича и астеносферного слоя, мощность верхней и нижней мантий) [12].

Поскольку построение геолого-геофизических критериев сейсмичности производилось при помощи геоинформационных технологий (ГИС-программы ArcView, ArcInfo), то изображение отдельного информационного слоя не представляет собой большой проблемы, но позволяет лучше понять распространение отдельных частей слоя в пространстве.

Необходимость анализа новейшей позднекайнозойской (позднеплиоценовой-четвертичной) структуры изучаемой территории определялась тем, что новейшая тектоника представляет собой тот структурный каркас, в который вписываются активные разломы и другие проявления современной тектонической активности, напрямую связанные с региональной сейсмичностью. Плановое распределение элементов ГАНЗ в пределах Восточной Сибири показывает, что наиболее высокие показатели активности характерны для южной границы Сибирской платформы и ее северо-восточного обрамления (Верхояно-Колымская складчатая область), хотя линейность простирающихся структур на востоке от платформы выражена не так эффектно как вдоль южной границы, вместе с тем, для всей территории к востоку от р. Лена характерны также весьма высокие значения ГАНЗ, впрочем, некоторая линейность прослеживается и на о-ве Сахалин. Для центральных областей Сибирской платформы присущи невысокие, но в то же время и ненулевые значения активности. Разумеется, все это связано с разными режимами неотектонической жизни структур.

Следует отметить, что впервые интегральные оценки геодинамической активности тех или иных районов Азии были предложены в работах сибирских исследователей, успешно объединивших их в геодинамическую активность литосферы Азии [13,14]. Такой же интегральный показатель (внерегionalный) использовался в работах Г.И. Рейснера с коллегами в работах по установлению сейсмической опасности различных районов Евразии [15].

Важнейшей составляющей сейсмотектонической модели являются прогнозные магнитуды землетрясений. Оценка максимально возможных магнитуд ожидаемых землетрясений производится по комплексу геолого-геофизических, сейсмологических и сейсмотектонических данных. Оценка магнитуды по комплексу сейсмотектонических данных основывается на глобальных статистических соотношениях между магнитудой землетрясения, протяженностью разрыва и величиной подвижки по нему [16–18].

Конечным итогом сейсмотектонических исследований является создание сейсмотектонической модели региона и построение карты зон ВОЗ в крупных масштабах 1:1 000 000, 1:500 000 и 1:200 000, что позволяет перейти к картам детального сейсмического районирования и в конечном итоге решить проблему определения уровня сейсмической опасности конкретных народнохозяйственных объектов. В ряде случаев такие исследования приводят к существенному сокращению участков с высокой (8–9 баллов) сейсмической опасностью по сравнению с картами общего сейсмического районирования (ОСР), что соответственно удешевляет будущее строительство. В других случаях могут быть найдены новые, ранее неизвестные источники сейсмических воздействий. Тогда уровень сейсмической опасности может быть повышен на локальных участках по сравнению с данными ОСР.

Сейсмотектоническое районирование предусматривает разделение территории на области, где ожидаемые «местные» землетрясения будут настолько слабы, что не окажут воздействия на население и систему его жизнеобеспечения, включая инженерные сооружения. Такие области считаются неспособными генерировать землетрясения и могут испытывать лишь сейсмические воздействия от удаленных сильных землетрясений. Другие области способны генерировать коровые землетрясения и потому называются зонами возникновения очагов землетрясений. Они подразделяются по их максимально возможной магнитуде и частоте возникновения. Выделение и параметризация, т.е. оценка сейсмического потенциала зон ВОЗ, производится

путем комплексного применения двух равнозначных групп критериев: сейсмологической и геолого-геофизической.

Сейсмологическая группа включает в себя каталоги произошедших землетрясений: инструментальных, исторических и голоценовых палеособытий, выявляемых по геологическим и георхеологическим данным, а также инструментальные и макросейсмические показатели распределения интенсивности сотрясений от осязаемых сейсмических событий, которые и служат основой всех дальнейших картографических построений. Кроме того, исследования планового распределения эпицентров землетрясений, помимо оценки самих сейсмических воздействий, позволяют очертить очаговые области сильных землетрясений и, тем самым, уточнить геометрию зон ВОЗ.

Приведенная карта распределения эпицентров землетрясений Восточной Сибири была построена при компиляции данных, полученных региональными отделениями геофизической службы РАН и СО РАН, а также при использовании каталогов локальных землетрясений, которые доступны по литературным источникам и свободно находятся в интернет-ресурсах на сайтах [19,20].

Анализ пространственного распределения эпицентров землетрясений на территории исследований показывает на приуроченность Южно-Сибирского сейсмического пояса к южной границе Сибирской платформы в области развития горно-складчатых орогенных структур Алтая, Саян, Тувы. Далее, пространственно тяготея к области Байкальской рифтовой зоны, проявления сейсмичности образуют эпицентральные поля Олекмо-Становой области и соединяются с сейсмичностью побережья Охотского моря. Другой Арктико-Азиатский сейсмический пояс прослеживается от побережья моря Лаптевых и через систему структур Верхояно-Колымской горно-складчатой области на юго-восток, соединяясь с сейсмичностью побережья Охотского моря и п-ва Камчатка.

Другим немаловажным фактором проявления сильных землетрясений определенных районов служит информация о механизмах очагов сильных землетрясений, сводный анализ которых позволяет установить напряженно-деформированное состояние среды в тех или иных элементах геологической и неотектонической структур. Факты приводимых решений механизмов очагов землетрясений были скомпилированы из многочисленных работ разных авторов и интернет-ресурсов, находящихся в свободном доступе на соответствующих сайтах американской геологической службы [7, 21–27].

Одним из главных выводов, следующим из рассмотрения пространственного распределения эпицентров землетрясений и решений фокальных механизмов их очагов, является то, что вся наблюдаемая современная сейсмичность и местоположение древних палеоземлетрясений группируются в протяженные сейсмические пояса, пространственно тяготеющие к южной и восточной границам Евразийской литосферной плиты. А тип напряженно-деформированного состояния земной коры указывает на превалирование процессов горизонтального сжатия вдоль всей континентальной части этой границы (за исключением Байкальской рифтовой области) и фрагментирование по геодинамическому принципу на отдельные сегменты Южно-Сибирского и Арктико-Азиатского сейсмических поясов.

Применение геолого-геофизической группы критериев зон ВОЗ в настоящее время состоит в выделении и параметризации активных геологических структур, в которых землетрясения определенной магнитуды и частоты возникали в недавнем прошлом и могут ожидать в близком будущем, к которому относятся оценки сейсмической опасности. Материалы детального изучения активных разломов и вторичных эффектов древних землетрясений, наряду с другими сеймотектоническими и сейсмологическими данными, ложатся в основу карты зон ВОЗ, что представляется едва ли не главной целью сеймотектонических исследований [4,6,9,28]. Поскольку активные разломы, как правило, соответствуют главным зонам возникновения очагов землетрясений региона, то даже качественный анализ рисунка и параметров разломов позволяет оконтурить такие зоны и выполнить их предварительное ранжирование. Численные характеристики зон ВОЗ, среди которых определяющими являются максимальная ожидаемая магнитуда землетрясений (M_{max}) и период повторяемости таких землетрясений, в основном опираются на сейсмологические и палеосейсмологические данные.

Детальное изучение активных разломов дает возможность составить представление о структуре очага и древних, доисторических сейсмических событиях, происшедших в этих же очаговых зонах. Очаги сильных и сильнейших землетрясений представляют собой устойчивые структуры в геологической среде (активные разломы), положение которых обусловлено особым сочетанием геолого-геофизических условий, причем кинематика подвижки от раза к разу может изменяться.

В большинстве случаев выходы очагов сильных современных землетрясений на поверхность

образуют некую область – зону сейсморазрывов, для которых уместно использовать понятие «зона динамического влияния разломов», которое разработано и введено в практику анализа дизъюнктивной тектоники С.Й. Шерманом и др. [29].

Ширина этой зоны влияния может достигать нескольких сотен метров и даже первых километров в зависимости от конкретных геолого-геоморфологических условий и силы землетрясения. При этом разрывы могут появляться на поверхности на разных участках зоны разлома, т.е. менять свое положение от одного землетрясения к другому. Суммарное смещение в очаге в приповерхностных условиях может рассеиваться в виде множества разрывов и связанных деформаций, однако все они образуют характерные структурные рисунки, свойственные тектоническим деформациям в целом. Обычно они приурочены к определенным геологическим структурам и формам рельефа, сформированным предыдущими сейсмическими подвижками. Эти древние события находят отражение не только в смещениях молодых отложений и форм рельефа, но и в развитии древних вторичных нарушений (палеосейсмодислокациях).

Палеосейсмологические исследования решают две основные задачи, имеющие важное практическое и теоретическое значение. Одна из них, направленная на установление величины самих палеособытий, касается выделения одноактных и приблизительно одновозрастных палеосейсмодислокаций. Вторая связана с определением морфокинематических типов активных разломов, по которым происходили эти разрывообразующие палеоземлетрясения [10,30,31]. В результате проведенных многолетних исследований все установленные активные разломы были вынесены нами на соответствующую топографическую основу территории Восточной Сибири с возможной установленной магнитудой генерируемых ими землетрясений.

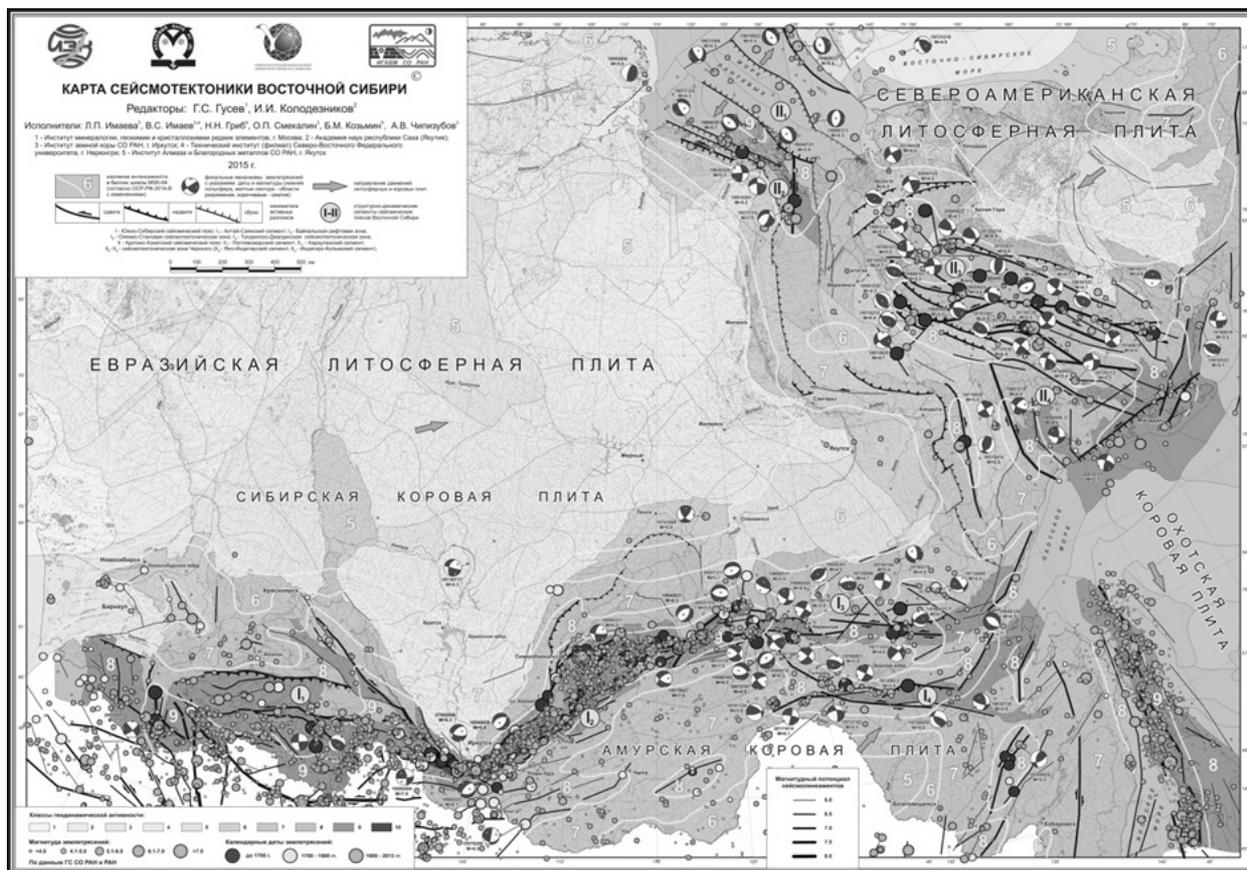
Обращает на себя внимание распространение активных разломов вдоль южной границы Евразийской литосферной плиты, в области взаимодействия ее с Амурской (Китайской) плитой, и формирование пояса активных разломов вдоль восточной границы Евразийской плиты, в пределах Верхояно-Колымской складчатой системы, пространственно формирующих западную границу Североамериканской литосферной плиты. Для такого распределения разломов характерно наличие крупных сейсмолинеаментов, способных генерировать самые сильные землетрясения с магнитудами $M = 7,5-8,0$, развитых в осевых частях выделенных сейсмических поясов и тяготеющих к самым активным частям геодинамически активных неотектонических зон.

Заключение

В конечном итоге комплексный анализ геолого-геофизических, геоморфологических и неотектонических данных, систем позднекайнозойских активных разломов, сейсмичности, результаты тектонофизических исследований позволили выявить на юге Восточной Сибири протяженный сейсмический пояс – Южно-Сибирский, состоящий из нескольких крупных отдельных сегментов: Алтай-Саяно-Тувинского, Байкальской рифтовой области и Олекмо-Становой зоны, соединяющих собой проявления сейсмичности сдвиговых структур Алтая, Саянской и Тувинской горно-складчатых областей, растяжения Байкальской рифтовой зоны, транспрессионные сдвигово-надвиговые перемещения Олекмо-Становой зоны и сейсмичность Охотского моря. Другой крупный сейсмический пояс – Арктико-Азиатский прослеживается вдоль границы между Евразийской и Североамериканской литосферными плитами и соединяет собой сейсмичность побережья Арктического океана, связанную с растяжением земной коры, далее через сдвигово-надвиговые структуры, развитые на континентальном отрезке границы плит, соединяется с сейсмогенными

структурами побережья Охотского моря и п-ва Камчатка.

Обобщенные материалы по сейсмотектонике и новейшей геодинамике сейсмических поясов на северо-востоке Азии дают возможность весьма успешно вести прогноз возможных сценариев поведения сейсмической активности территории, предполагая место и предельную величину возможной сейсмической катастрофы. Определение структурной позиции позволяет предполагать наиболее опасные направления выделения сейсмической энергии и снижать степень риска расположения потенциальных народнохозяйственных объектов. Построенная карта сейсмотектоники Восточной Сибири представляет собой комплексную многослойную модель развития сейсмотектонических процессов, протекающих на исследуемой территории, составленную впервые для этой территории с использованием геоинформационных технологий. Применение новых технологий позволило при построении оперировать построенной картой, как последовательным рассмотрением нескольких информационных слоев, содержащих определенную заданную информацию, характеризующую сейсмотектонические процессы территории Восточной Сибири (рисунок).



Карта сейсмотектоники Восточной Сибири с нанесенными на нее изолиниями балльности возможных интенсивностей сейсмических сотрясений (по шкале MSK-64), соответствующих карте ОСР-2014-В (с повторяемостью 1000 лет), с доавлениями и исправлениями

Дополнительно на карту была вынесена интенсивность возможных сейсмических сотрясений в баллах (по шкале MSK-64), соответствующая новой карте Общего сейсмического районирования РФ (ОСР-2014-В), и расчетным событиям с периодичностью 1 раз в 1000 лет. Именно такой диапазон будущих толчков соответствует интересам народнохозяйственного освоения территории. Вместе с тем следует учесть, что рассматриваемая территория (особенно территория Якутии) все еще представляет собой весьма сложный и малоосвоенный (недостаточно изученный) регион России, где происходят активные деформации между несколькими тектоническими плитами, что конечно требует дальнейшего детального изучения отдельных частей этих сейсмических поясов. Это, прежде всего, относится к прибрежно-шельфовым областям арктических морей Восточной Сибири, с активным освоением которых связана ближайшая стратегия развития РФ и в конечном итоге экономическая и социальная безопасность будущего нашей страны.

Подводя итог сейсмотектонических исследований, можно констатировать:

1. Карта сейсмотектоники Восточной Сибири является первым наглядным примером построения карты нового поколения (электронная база данных сейсмотектонических параметров), которая объединяет элементы геолого-геофизических параметров и сейсмичности и объясняет особенности современной геодинамики (а соответственно и сейсмическую опасность) региона.

2. Построение таких карт позволяет перейти к созданию карт детального сейсмического районирования отдельных частей активно промышленно осваиваемых районов Восточной Сибири и обоснованно установить уровень сейсмической угрозы тех или иных районов проживания населения Сибири. Данный подход позволит приступить к новому этапу исследований проблемы сейсmobезопасности, а созданные региональные сейсмогеодинамические модели будут способствовать уточнению исходного сейсмического балла существующих нормативных карт общего и детального сейсмического районирования.

3. Карта рекомендуется и может использоваться в органах исполнительной власти отдельных районов, комитетах по чрезвычайным ситуациям с целью владения информацией о возможных негативных влияниях сильных землетрясений, определения балла сейсмической угрозы конкретных населенных пунктов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки и РФ (гос. задание N 5.1771.2014/К).

Литература

1. *Геологический словарь*. В 2-х т. – М.: Недра, 1973. – 986 с.
2. *Allen C.R.* Geological criteria for evaluating seismicity // *Bull. Geol. Soc. Amer.* – 1975. – Vol.86, №8. – P. 1041–1057.
3. *J.P. McCaLpin.* *Paleoseismology*. 2-nd ed. – Amsterdam–London: Academic press, 2009. – 615 p. (international series, 95).
4. *Yeats R.S., Sieh K., Allen C.R.* 1997 // *Geology of Earthquakes*. Oxford university press. – 568 p.
5. *Горшков Г.П.* Региональная сейсмотектоника территории юга СССР, Альпийский пояс. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
6. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмотектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с.
7. *Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.* Сейсмотектонический анализ Яно-Индибирского сегмента зоны // *Физика Земли*. – 2011. – № 12. – С. 1–14.
8. *Рогожин Е.А., Платонова С.Г.* Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 130 с.
9. *Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмотектоники. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 340 с.
10. *Сейсмотектоника, вулканы и сейсмическое районирование хребта Станового* / В.В. Николаев, Р.Ф. Семенов, В.Г. Семенова, В.П. Солоненко. – Новосибирск: Наука, 1982. – 150 с.
11. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
12. *Гусев Г.С., Имаева Л.П.* Новейшая и современная тектоническая (геодинамическая) активность территории России // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 12. – С. 29–35.
13. *Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г.* Современная геодинамическая активность литосферы Сибири в кайнозойе // *Геология и геофизика*. – 1987. – № 8. – С. 3–10.
14. *Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г.* Геодинамическая активность литосферы Азии: основы анализа и принципы картирования // *Геодинамика и развитие тектоносферы: Труды Тектонического совещания МТК*. – М., 1991. – С. 31–39.
15. *Рейснер Г.И., Йогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е.* Типизация земной коры и современные геологические процессы. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – 208 с.
16. *Палеосейсмология*. В 2-х т. / Ред. Дж.П. Мак-Калпин. – М.: Научный мир, 2011. – 878 с.

17. *Стром А.Л.* Сопоставление параметров современных и палеосейсмодислокаций // *Физика Земли*. – 1993. – № 9. – С. 38–42.
18. *Стром А.Л., Никонов А.А.* Корреляция между параметрами сейсмодислокаций и магнитудами землетрясений // *Физика Земли*. – 1997. – № 12. – С.55–67.
19. *Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E. et al.* Seismicity Map of Eastern Russia (1910-2-10) // *Seismological Research Letters*. – 2010. – V.81, №5. – P.761–768.
20. <http://www.seismos-u.ifz.ru/>.
21. *Мельникова В.И.* Деформационные параметры земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным: Автореф. дис. ...д.г.-м.н. – Иркутск, 2008. – 38 с.
22. *Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И. и др.* Землетрясение 6 января 2006 г. (Mw = 4.5): Редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53, № 10. – С. 1430–1444.
23. *Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П.* Параметры землетрясения 27 сентября 2003 г. на Алтае по инструментальным данным // *Вестник ОНЗ РАН: Электр. науч.-инф. журнал*. – 2005. – №1. – С. 1–12.
24. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., и др.* Тувинское землетрясение 27.12.2011, ML=6.7 и его афтершоки // *Вестник ОНЗ РАН: Электр. науч.-инф. журнал*. – 2012. – Т.4, NZ2002, doi:10.2205/2012NZ000112.
25. *Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.
26. *Centroid Moment Tensor Catalog* (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).
27. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.
28. *Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В.* Изучение и картирование активных разломов // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. Т 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 196–206.
29. *Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). – Новосибирск: Наука, 1983. – 100 с.
30. *Аржанников С.Г.* Палеосейсмодислокации в зоне влияния Отгугтайгино-Азасского разлома (Восточная Тува) // *Геология и геофизика*. – 2000. – Т.41, № 11. – С. 1501–1510.
31. *Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В.* Палеосейсмология Восточной Сибири (некоторый опыт практического применения). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. – 99 с.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 551.734. 571.5

Глобальные события (Lower Pridolian и Klonk) в среднем палеозое Северо-Востока Евразии и на сопредельных территориях

В.В. Баранов

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

*В среднем палеозое Северо-Востока Евразии выделяются два глобальных событийных уровня, где сопрягаются системная перестройка климата, седиментогенеза и экспансия пионерных сообществ брахиопод. Первое – это Lower Pridolian Event, фиксирующиеся на границе лудфорда/пржидола смежной остракодовой сульфатно-красноцветной фашии полузамкнутых лагун на брахиоподово-известняковую фашию мелкого шельфа и взрывным появлением пионерных ассоциаций брахиопод *Atrypa phoca* (Salter) и *Collarothyris canaliculata* (Wenjukow), и второе – Klonk Event, установленное на границе силура/девона, где сероцветная водорослево-доломитовая фашия лагун замещается брахиоподово-известняковой фашией мелкого шельфа и появляются ассоциации раннедевонских табулят, брахиопод и конодонтов *Zieglerodina remscheidensis* (Ziegler).*

Ключевые слова: средний палеозой, лудфорд, пржидол, лохков, Lower Pridolian Event, Klonk Event, Северо-Восток Евразии.

17. *Стром А.Л.* Сопоставление параметров современных и палеосейсмодислокаций // *Физика Земли*. – 1993. – № 9. – С. 38–42.
18. *Стром А.Л., Никонов А.А.* Корреляция между параметрами сейсмодислокаций и магнитудами землетрясений // *Физика Земли*. – 1997. – № 12. – С.55–67.
19. *Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E. et al.* Seismicity Map of Eastern Russia (1910-2-10) // *Seismological Research Letters*. – 2010. – V.81, №5. – P.761–768.
20. <http://www.seismos-u.ifz.ru/>.
21. *Мельникова В.И.* Деформационные параметры земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным: Автореф. дис. ...д.г.-м.н. – Иркутск, 2008. – 38 с.
22. *Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И. и др.* Землетрясение 6 января 2006 г. (Mw = 4.5): Редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53, № 10. – С. 1430–1444.
23. *Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П.* Параметры землетрясения 27 сентября 2003 г. на Алтае по инструментальным данным // *Вестник ОНЗ РАН: Электр. науч.-инф. журнал*. – 2005. – №1. – С. 1–12.
24. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., и др.* Тувинское землетрясение 27.12.2011, ML=6.7 и его афтершоки // *Вестник ОНЗ РАН: Электр. науч.-инф. журнал*. – 2012. – Т.4, NZ2002, doi:10.2205/2012NZ000112.
25. *Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 125 с.
26. *Centroid Moment Tensor Catalog* (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).
27. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.
28. *Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В.* Изучение и картирование активных разломов // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. Т 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 196–206.
29. *Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). – Новосибирск: Наука, 1983. – 100 с.
30. *Аржанников С.Г.* Палеосейсмодислокации в зоне влияния Отгугтайгино-Азасского разлома (Восточная Тува) // *Геология и геофизика*. – 2000. – Т.41, № 11. – С. 1501–1510.
31. *Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В.* Палеосейсмология Восточной Сибири (некоторый опыт практического применения). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. – 99 с.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 551.734. 571.5

Глобальные события (Lower Pridolian и Klonk) в среднем палеозое Северо-Востока Евразии и на сопредельных территориях

В.В. Баранов

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

*В среднем палеозое Северо-Востока Евразии выделяются два глобальных событийных уровня, где сопрягаются системная перестройка климата, седиментогенеза и экспансия пионерных сообществ брахиопод. Первое – это Lower Pridolian Event, фиксирующиеся на границе лудфорда/пржидола смежной остракодовой сульфатно-красноцветной фашии полузамкнутых лагун на брахиоподово-известняковую фашию мелкого шельфа и взрывным появлением пионерных ассоциаций брахиопод *Atrypa phoca* (Salter) и *Collarothyris canaliculata* (Wenjukow), и второе – Klonk Event, установленное на границе силура/девона, где сероцветная водорослево-доломитовая фашия лагун замещается брахиоподово-известняковой фашией мелкого шельфа и появляются ассоциации раннедевонских табулят, брахиопод и конодонтов *Zieglerodina remscheidensis* (Ziegler).*

Ключевые слова: средний палеозой, лудфорд, пржидол, лохков, Lower Pridolian Event, Klonk Event, Северо-Восток Евразии.

*In the Middle Paleozoic of Northeastern Eurasia there are two global event levels where systemic restructuring of climate and sedimentogenesis and expansion of pioneer communities of brachiopods mate. The first is a Lower Pridolian Event fixed on the boundary of Ludfordian/Pridolian with the change of ostracode sulfate facies of red semi-lagoon by brachiopod limestone facies shallow shelf and the explosive advent of pioneering associations of brachiopods *Atrypoides phoca* (Salter) and *Collarothyris canaliculata* (Wenjukow). And the second is Klonk Event set on the Silurian/Devonian boundary, where grey-colored algal-dolomite lagoonal facies are replaced by brachiopod limestone facies-shallow shelf and associations of Early Devonian tabulate corals, brachiopods and conodonts *Zieglerodina remscheidensis* (Ziegler) appear.*

Key words: Middle Paleozoic, Ludford, Pridolian, Lochkovian, Lower Pridolian Event, Klonk Event, Northeastern Eurasia.

В настоящее время в геологической литературе наблюдается шквал публикаций о причинах массовых вымираний в среднем палеозое, обычно приуроченных к границам систем и ярусов Международной (планетарной) стратиграфической шкалы. Причины называются разные: импакты – следы ударов крупных болидов, аноксия, резкое изменение климата, оледенения, крупномасштабные вулканические извержения, планетарные излияния траппов. И относительно меньше работ посвящено взрывам биологического разнообразия, а причины, их вызывающие, до настоящего времени четко не определены. В последнее время становится очевидным, что все эти события и процессы взаимосвязаны и характеризуются цикличностью разных порядков. Причины, вызывающие мелкоамплитудную цикличность (сутки, год, первые сотни тысяч лет), обоснованы солнечно-земными связями, а крупные циклы можно объяснить только физикой процессов, происходящих в нашей галактике или Вселенной [1, 2]. Автором в нижнем девоне Северо-Востока Евразии была установлена сопряженность этапности развития биоты с цикличностью седиментации и это послужило основой для выделения региональных ярусных подразделений [3–5]. В среднем и верхнем девоне Южного Верхоянья были выявлены седиментологические и биотические события глобального, межрегионального и регионального масштабов [6], а также рассматривались эволюция метабиосферы и кризисы экосистем в раннем и среднем палеозое и коэволюция их с абиотическими процессами [7, 8]. В предыдущей статье [9] автор описал крупнейшее седиментологическое событие, связанное с отложением красноцветных и сульфатонесущих толщ в Северном полушарии, сопряженное с финальной стадией ордовикско-лудфордского мегацикла и аридным климатом, которое можно назвать Redbeds Ludfordian Event.

В позднем силуре Северо-Востока Евразии выделяются еще два значимых событийных уровня, на которых происходила системная перестройка климата, седиментогенеза и экспансия брахиоподовых сообществ – это Lower Pridolian Event и Klonk Event. (рис. 1).

В интервале Lower Pridolian Event сопряжены седиментологическое, биотическое и климатическое суперсобытия, произошедшие на Северном полушарии Земли. Нижняя граница события совпадает с нижней границей пржидольской серии. На этом рубеже: 1) заканчивается финальная стадия ордовикско-луддовского трансгрессивно-регрессивного мегацикла и начинается следующий пржидольско-эйфельский мегацикл; 2) наблюдается смена режима осадконакопления: красноцветная остракодная сульфатно-глинисто-доломитовая формация лагун сменяется сероцветной брахиоподовой глинисто-известняковой формацией мелкого шельфа; 3) полностью исчезают представители

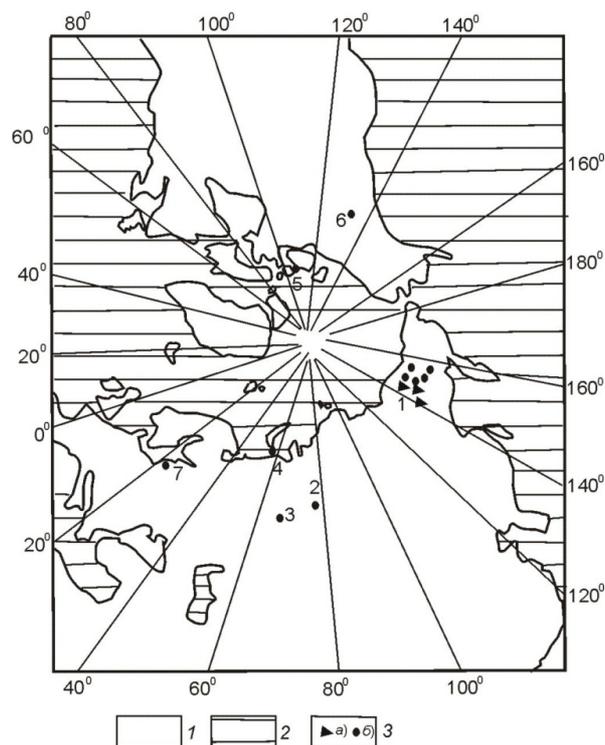


Рис. 1. Местоположение глобальных событий (Lower Pridolian и Klonk events) на севере Евразии и прилегающих территориях (полярная проекция):

1 – суша; 2 – море; 3 – глобальные события: а – Lower Pridolian; б – Klonk (1 – Северо-Восток Евразии, 2 – Западная Сибирь, 3 – юго-восток Западно-Сибирской плиты, 4 – Урало-Новоземельский регион, 5 – Арктическая Канада, 6 – Канада, территория Юкон, 7 – Балтия)

отряда Pentamerida и появляются два рода *Atrypoida* и *Collarothyris*, представленные, соответственно, видами *A. phoca* (Salter) и *C. canaliculata* (Wenjukow), которые пользуются широким распространением на территории Северного полушария; 4) изменяется вектор климата от аридного на переходный от аридного к гумидному.

На территории Чехии, в Пражском бассейне, нижняя граница пржидольской серии проходит внутри Пожарской формации (Pořary Formation), в слоистой известняково-глинистой толще по первому появлению граптолита *Monograptus parvultimus*, но никаких значимых биотических и абиотических событий в этом интервале здесь не наблюдается.

На Северо-Востоке Евразии нижняя граница Lower Pridolian Event прослеживается на восточном склоне хребта Тас-Хаяхта, по правому притоку р. Артых-Юрях. Здесь, на правом его борту в 2 км от устья в коренном обнажении

фиксируется резкая граница между красноцветами сульфатоносными отложениями (артых-юряхская свита) лудфорда и темно-серыми до черных глинистыми, комковатыми известняками (нижнетальнджинская подсвита) пржидольского возраста. Такая же картина наблюдается в Селенняхском кряже, по правым притокам р. Тальнджи (ручьи Самыр, Серп) и на водоразделе рек Тальнджи и Джяпканджа-II, в хребте Улахан-Сис, на левобережье р. Кусаган-Юрях. Верхняя граница события проводится по смене режима осадконакопления – сероцветная брахиоподово-глинисто-известняковая фация замещается желтовато-сероцветной водорослево-доломитовой фацией. На этом рубеже на общем фоне нарастающей трансгрессии наблюдается регрессивный откат и аридизация климата и, как следствие, происходит вымирание представитель родов *Atrypoida* и *Collarothyris* (рис. 2).

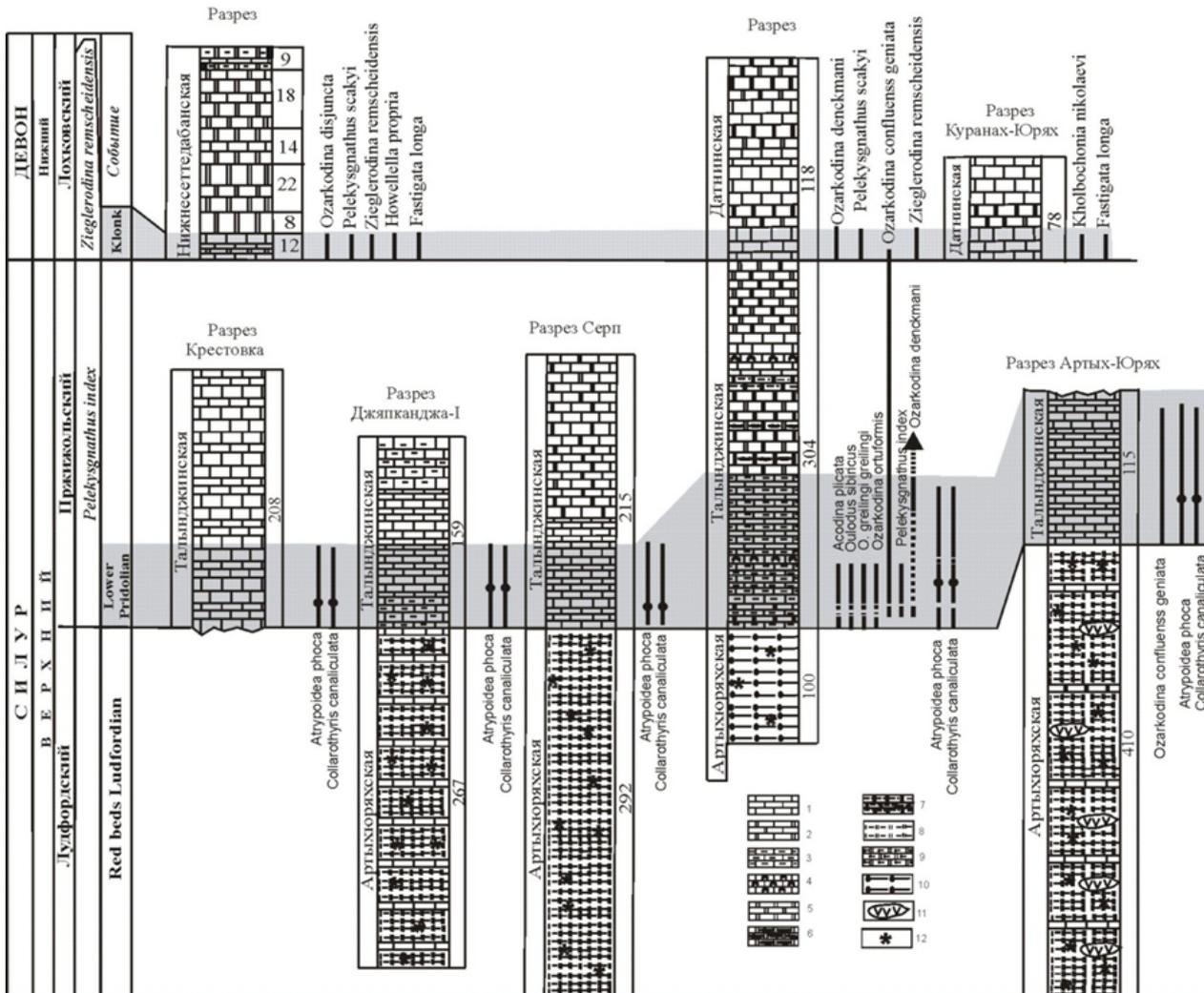


Рис. 2. Глобальные события Lower Pridolian и Klonk events в опорных разрезах среднего палеозоя Северо-Востока Евразии: 1 – известняки; 2 – известняки доломитистые; 3 – известняки глинистые; 4 – известняки строматолитовые; 5 – доломиты; 6 – доломиты с прослоями вторичных кремней; 7 – доломиты алевритистые; 8 – мергели; 9 – доломиты глинистые; 10 – алевролиты; 11 – гипсы и ангидриты; 12 – пестроцветность

На юго-западном обрамлении Сибирской платформы биотическая составляющая Lower Pridolian Event прослеживается в Горном Алтае и Тыве, где обнаружены представители *Atrypoida* (= *Atrypella*) и *Collarothyris* (= *Didymothyris*) [10, 11]. Это же событие прослеживается на юго-востоке Западно-Сибирской плиты, где встречаются представители *Atrypoida phoca* (Salter) [12]. В Северо-Уральско-Новоземельском регионе, так же как на Северо-Востоке Евразии, Lower Pridolian Event седиментологическая составляющая представлена комковатыми глинистыми известняками, а биотическая – массовым появлением бентосных сообществ *Atrypoida phoca* и *Collarothyris canaliculata* в сочетании с другими видами беспозвоночных [13–15]. Биотическая составляющая Lower Pridolian Event прослеживается и в бассейнах Балтии, где она также характеризуется появлением *Atrypoida phoca* и *Collarothyris canaliculata* в комплексе с другими видами брахиопод [16].

На островах Канадского Арктического Lower Pridolian Event представлено комковатыми глинистыми известняками с *Atrypoida phoca* [17]. Б. Джонс [18] из формации Рид Бей острова Сомерсет описал *Protathyris praecursor* Kozłowski, 1929, который по внешнему и внутреннему строению соответствует представителям вида *Collarothyris canaliculata* (Wenjukow).

Событие Klonk Event было выделено в Пражском бассейне (Чехия) исключительно как биотическое, поскольку отвечало границе между силурийской и девонской системами [19, 20]. В процессе дальнейших исследований ниже этой границы был выявлен положительный экскурс $\delta^{13}\text{C}$ [21]. Это событие отмечается и в Подолии (Украина) [22, 23]. На Северо-Востоке Евразии на нижней границе девонской системы с Klonk Event сопряжено несколько значимых событий: 1) начинается инициальная стадия лохковского регоциклита; 2) происходит смена желтовато-серой остракодово-доломитовой фации лагун – сероцветной брахиоподово-конодонтово-известняковой фацией; 3) наблюдается смена остракодовых сообществ полуоткрытых лагун пионерными брахиоподовыми сообществами мелкого шельфа; 4) вектор климата продолжается сменяться от аридного к муссонному.

В Южном Верхоянье, на правом берегу р. Восточной Хандыги в разрезе Тихий это событие зафиксировано в 12-метровой пачке известняков. Здесь наблюдается резкий контакт между желтыми доломитами хуратской свиты верхнего силура и темно-серыми известняками нижне-сетттедабанской подсвиты нижнего девона. На этой границе биотическое событие представлено пионерными ассоциациями брахиопод *Gur-*

dula sp., *Atrypinella delicata* I. et M. Breivel, *Victorhynchus settedabanicus* Baranov, *Fastigata longa* Baranov, *Howellella propria* T. Modzalevskaya, *H. labilis* T. Modzalevskaya и конодонтов *Pelekysgnathus index* Klapper et Murphy. *P. scakyi* Lane (= *P. fedotovi* Sobolev), *Zieglerodina remscheidensis* (Ziegler) с преобладанием представителей родов *Acodina* и *Panderodus*. Седиментологическое событие характеризуется сменой типа осадконакопления: осадки изолированных лагун замещаются здесь темноцветными известняками мелкого шельфа.

В горной системе Черского (хребет Тас-Хаяхта) Klonk Event наблюдается в начале раннего девона. Здесь также происходит сопряженность двух событий – биотического и седиментологического. Первое представлено появлением пионерной ассоциации брахиопод *Spinatrypina* sp., *Kholbochonia nikolaevi* Baranov, *Fastigata longa* Baranov, а второе – сменой режима – зеленовато-серые мергели мелководной лагуны сменяются в разрезе темноцветными известняками базальной части датнинской свиты. В Селенняхском кряже эти два события также совмещены. Биотическое событие характеризуется появлением ассоциации конодонтов *Pelekysgnathus scakyi* Lane и *Zieglerodina remscheidensis* (Ziegler), а седиментологическое – представлено известняками и совпадает с инициальной трансгрессивной стадией лохковского регоциклита.

Выводы. В среднепалеозойском этапе развития палеобассейнов севера Евразии и Северной Америки выделено два глобальных событийных уровня Lower Pridolian Event и Event Klonk Event, первое из них приурочено к границе лудфорда/пржидола, а второе зафиксировано на границе пржидола и лохкова. На этих рубежах наблюдаются системная перестройка седиментогенеза, связанная с инициальными стадиями трансгрессивно-регрессивной цикличности, массовое вымирание ранее существовавших и появление новых таксонов среди беспозвоночных и изменение вектора климата от аридного к гумидному.

Литература

1. *Преображенский Б.В.* Метафизика и метаморфозы естествознания. – Владивосток: Изд-во «Эмахо», 2010. – 526 с.
2. *Чернуха В.В.* Мы и миры Мироздания: Новая физическая картина мира. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 400 с.
3. *Баранов В.В.* Цикличность седиментогенеза, этапность и стадийность развития биоты в позднем силуре и раннем девоне Северо-Востока Евразии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2009. – Т. 17, № 4. – С. 382–395.
4. *Баранов В.В.* Выделение региональных ярусных подразделений верхнего силура и ниж-

него девона Северо-Востока Евразии на основе цикличности седиментации и этапности развития фауны // Эволюция органического мира и биогенетические кризисы: Материалы LVI сессии Палеонтологического общества при РАН (5–9 апреля 2010 г., Санкт-Петербург). – СПб., 2010. – С. 21–23.

5. Баранов В.В. Синхронность цикличности осадконакопления и этапности эволюции биоты – основа для выделения региональных ярусных подразделений в верхнем силуре и нижнем девоне Северо-Востока Евразии // Наука и образование. – 2013. – № 4. – С. 32–37.

6. Баранов В.В. Средний и верхний девон юго-восточного обрамления Сибирской платформы (Южное Верхоянье, хребет Сетте-Дабан) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2007а. – Т. 15, № 5. – С. 58–73.

7. Баранов В.В. Эволюция метабиосферы и кризисы экосистем в раннем – среднем палеозое Северо-Востока Евразии // Отечественная геология. – 2008б. – № 5. – С. 66–72.

8. Баранов В.В., Васильева А.Е. Козволюция биотических и абиотических процессов и событий в раннем и среднем палеозое Северо-Востока Евразии // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (23–30 сентября 2014 г., пос. Листвянка, Иркутская область). – Иркутск, 2014. – С. 88–92.

9. Баранов В.В. Пограничные силурийско-девонские красноцветные отложения Северного полушария Земли и их значение для палеогеографических реконструкций // Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 32–37.

10. Кульков Н.П. Брахиоподы и стратиграфия силура Горного Алтая. – М.: Наука, 1967. – 148 с.

11. Кульков Н.П., Владимирская Е.В., Рыбкина Н.Л. Брахиоподы и биостратиграфия верхнего ордовика и силура Тувы. – М.: Наука, 1985. – 208 с.

12. Кульков Н.П., Перегоедов Л.Г. Класс Articulata // Стратиграфия палеозойских отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск, 1990. – С. 70–106.

13. Никифорова О.И. Брахиоподы гребенского горизонта Вайгача (поздний силур) // Стратиграфия и фауна силурийских отложений Вайгача. – Л., 1970. – С. 97–149.

14. Модзалевская Т.Л. Брахиоподы силура и раннего девона европейской части СССР. – М.: Наука, 1985. – 128 с.

15. Безносова Т.М. Сообщества брахиопод и биостратиграфия верхнего ордовика, силура и нижнего девона северо-восточной окраины палеоконтинента Балтия. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2008. – 216 с.

16. Рубель М.П., Модзалевская Т.Л. Новые силурийские брахиоподы семейства Athyrididae // Известия АН ЭССР. Химия, Геология. – 1967. – Т. 16, № 3. – С. 238–249.

17. Smith R.E., Johnson J.G. *Atrypella scheii* (Holtedhal) and *Atrypella phoca* (Salter), (Silurian brachiopoda) // J. Paleontology. – 1977. – Vol. 51, № 2. – P. 350–356.

18. Jones B. Variation in the Upper Silurian brachiopod *Protathyris praecursor* 17. Kozłowski 1929; its cause and implications // J. of Paleontology. – 1978. – Vol. 52. – P. 8–27.

19. Walliser O.H. Natural boundaries and Commission boundaries in the Devonian // Courier Forschungsinstitut Senckenberg. – 1985. – Vol. 75. – P. 401–408.

20. Jeppsson L. Silurian Oceanic Events: Summary of General Characteristic // New York State Museum Bulletin. – 1998. – Vol. 491. – P. 239–257.

21. Manda Š. and Fryda J. Silurian-Devonian boundary events and their influence on cephalopod evolution: evolutionary significance of cephalopod egg size during mass extinctions // Bulletin of Geosciences. – 2010. – Vol. 85, № 3. – P. 513–540.

22. Nikiforova O.I., Modzalevskaya T.L. and Basset M.G. Review of the upper Silurian and lower Devonian articulate brachiopods of Podolia // Special Papers in Paleontology. – 1985. – Vol. 34. – P. 1–66.

23. Baliński A. The brachiopod succession through the Silurian-Devonian boundary beds at Dnistrove, Podolia, Ukraine // Acta Paleontologica Polonica. – 2012. – Vol. 54, № 4. – P. 897–924.

Поступила в редакцию 29.06.2015

УДК 551.49

О важности организации геометрического мониторинга при подземном захоронении дренажных вод в мерзлую толщу

С.П. Готовцев, И.В. Климовский, В.В. Шепелев

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

ГОТОВЦЕВ Семен Петрович – к.г.-м.н., с.н.с., gotovcev@mpi.ysn.ru; КЛИМОВСКИЙ Игорь Владимирович – к.г.-м.н., с.н.с., mpi@ysn.ru; ШЕПЕЛЕВ Виктор Васильевич – д.г.-м.н., проф., зам. директора по науке, sheply@mpi.ysn.ru.

него девона Северо-Востока Евразии на основе цикличности седиментации и этапности развития фауны // Эволюция органического мира и биогенетические кризисы: Материалы LVI сессии Палеонтологического общества при РАН (5–9 апреля 2010 г., Санкт-Петербург). – СПб., 2010. – С. 21–23.

5. Баранов В.В. Синхронность цикличности осадконакопления и этапности эволюции биоты – основа для выделения региональных ярусных подразделений в верхнем силуре и нижнем девоне Северо-Востока Евразии // Наука и образование. – 2013. – № 4. – С. 32–37.

6. Баранов В.В. Средний и верхний девон юго-восточного обрамления Сибирской платформы (Южное Верхоянье, хребет Сетте-Дабан) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2007а. – Т. 15, № 5. – С. 58–73.

7. Баранов В.В. Эволюция метабиосферы и кризисы экосистем в раннем – среднем палеозое Северо-Востока Евразии // Отечественная геология. – 2008б. – № 5. – С. 66–72.

8. Баранов В.В., Васильева А.Е. Козволюция биотических и абиотических процессов и событий в раннем и среднем палеозое Северо-Востока Евразии // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (23–30 сентября 2014 г., пос. Листвянка, Иркутская область). – Иркутск, 2014. – С. 88–92.

9. Баранов В.В. Пограничные силурийско-девонские красноцветные отложения Северного полушария Земли и их значение для палеогеографических реконструкций // Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 32–37.

10. Кульков Н.П. Брахиоподы и стратиграфия силура Горного Алтая. – М.: Наука, 1967. – 148 с.

11. Кульков Н.П., Владимирская Е.В., Рыбкина Н.Л. Брахиоподы и биостратиграфия верхнего ордовика и силура Тувы. – М.: Наука, 1985. – 208 с.

12. Кульков Н.П., Перегоедов Л.Г. Класс Articulata // Стратиграфия палеозойских отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск, 1990. – С. 70–106.

13. Никифорова О.И. Брахиоподы гребенского горизонта Вайгача (поздний силур) // Стратиграфия и фауна силурийских отложений Вайгача. – Л., 1970. – С. 97–149.

14. Модзалевская Т.Л. Брахиоподы силура и раннего девона европейской части СССР. – М.: Наука, 1985. – 128 с.

15. Безносова Т.М. Сообщества брахиопод и биостратиграфия верхнего ордовика, силура и нижнего девона северо-восточной окраины палеоконтинента Балтия. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2008. – 216 с.

16. Рубель М.П., Модзалевская Т.Л. Новые силурийские брахиоподы семейства Athyrididae // Известия АН ЭССР. Химия, Геология. – 1967. – Т. 16, № 3. – С. 238–249.

17. Smith R.E., Johnson J.G. *Atrypella scheii* (Holtedhal) and *Atrypella phoca* (Salter), (Silurian brachiopoda) // J. Paleontology. – 1977. – Vol. 51, № 2. – P. 350–356.

18. Jones B. Variation in the Upper Silurian brachiopod *Protathyris praecursor* 17. Kozłowski 1929; its cause and implications // J. of Paleontology. – 1978. – Vol. 52. – P. 8–27.

19. Walliser O.H. Natural boundaries and Commission boundaries in the Devonian // Courier Forschungsinstitut Senckenberg. – 1985. – Vol. 75. – P. 401–408.

20. Jeppsson L. Silurian Oceanic Events: Summary of General Characteristic // New York State Museum Bulletin. – 1998. – Vol. 491. – P. 239–257.

21. Manda Š. and Fryda J. Silurian-Devonian boundary events and their influence on cephalopod evolution: evolutionary significance of cephalopod egg size during mass extinctions // Bulletin of Geosciences. – 2010. – Vol. 85, № 3. – P. 513–540.

22. Nikiforova O.I., Modzalevskaya T.L. and Basset M.G. Review of the upper Silurian and lower Devonian articulate brachiopods of Podolia // Special Papers in Paleontology. – 1985. – Vol. 34. – P. 1–66.

23. Baliński A. The brachiopod succession through the Silurian-Devonian boundary beds at Dnistrove, Podolia, Ukraine // Acta Paleontologica Polonica. – 2012. – Vol. 54, № 4. – P. 897–924.

Поступила в редакцию 29.06.2015

УДК 551.49

О важности организации геометрического мониторинга при подземном захоронении дренажных вод в мерзлую толщу

С.П. Готовцев, И.В. Климовский, В.В. Шепелев

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

ГОТОВЦЕВ Семен Петрович – к.г.-м.н., с.н.с., gotovcev@mpi.ysn.ru; КЛИМОВСКИЙ Игорь Владимирович – к.г.н., с.н.с., mpi@ysn.ru; ШЕПЕЛЕВ Виктор Васильевич – д.г.-м.н., проф., зам. директора по науке, sheply@mpi.ysn.ru.

Представлен анализ результатов многолетних геотермических наблюдений на полигонах подземного захоронения дренажных вод, откачиваемых из карьера месторождения трубки «Удачная» (Западная Якутия). По особенностям изменения температурного поля мерзлой толщи выделены три гидрогеотермические зоны. Динамика температуры горных пород в выделенных зонах может служить критерием для оценки воздействия сбрасываемых вод на геологическую среду и основой для разработки мероприятий по минимизации их негативного влияния на экологическую обстановку.

Ключевые слова: криогенная толща, многолетнемерзлые горные породы, геотермический мониторинг, карьер, дренажные воды, подземное захоронение.

The results of long-term ground temperature observations at subsurface disposal sites of drainage water from the Udachnaya diamond mine in Western Yakutia are presented. Three hydrogeothermal zones are identified based on the changes in the temperature field of the permafrost. The ground temperature dynamics in these zones can be used as criteria for assessing the effect of injected water on the geological environment, as well as a basis for developing measures to mitigate adverse environmental impacts.

Key words: permafrost, perennially frozen ground, ground temperature monitoring, open-pit mine, drainage water, subsurface disposal.

Состояние вопроса

В начале 80-х годов прошлого века в связи с разработкой глубоких горизонтов кимберлитовых трубок на рудниках акционерной компании «АЛРОСА» встала проблема осушения от дренажных вод алмазодобывающих карьеров. Подземные воды, поступающие в забой карьеров, представлены подмерзлотными хлоридными натриевыми или кальциевыми рассолами с минерализацией до 400 г/л. На некоторых месторождениях они содержат бром, бор, литий, стронций и другие токсичные микроэлементы, намного превышающие ПДК. Попадание таких рассолов в наземную экосистему крайне опасно.

На начальном этапе работ были опробованы разные способы утилизации дренажных рассолов, в том числе их наземное хранение в искусственно сооруженных котлованах, закачка в подземные горизонты и даже открытый сброс в речные системы в период весенних паводков [1]. После проведения ряда опытно-промышленных экспериментов был выбран способ подземного захоронения дренажных рассолов в многолетнемерзлой толще [2–4]. При этом на рудниках «Мир» и «Интернациональный» применялся метод обратной закачки рассолов в подмерзлотные водоносные горизонты, а на трубках «Удачная», «Юбилейная» и «Айхал» они сбрасывались в толщу многолетнемерзлых горных пород (ММП).

Подземный способ утилизации токсичных промышленных стоков считается наиболее безопасным для окружающей природной среды [5–8]. В настоящее время этот способ широко применяется для захоронения токсичных жидких отходов нефтегазовой, химической и других отраслей промышленности. В последнее время стали широко обсуждаться вопросы использования криогенной толщи в качестве среды для подземной изоляции радиоактивных отходов [9, 10].

Многолетнемерзлая толща как объект, выбранный для захоронения токсичных дренажных рассолов, является термодинамически неустойчивой системой, поэтому мониторинг ее температуры должен быть обязательным мероприятием на всех этапах захоронения, поскольку гидроизолирующее свойство криогенной толщи зависит от их температуры. В настоящей работе рассматриваются динамика геотермического состояния мерзлого массива при захоронении дренажных рассолов и особенности организации геотермического мониторинга криогенной толщи на примере осушения карьера месторождения трубки «Удачная».

Характеристика объекта исследования

Коренное месторождение алмазов трубки «Удачная» расположено на широте Полярного круга в 700 км севернее г. Мирного. Месторождение стало осваиваться в начале 70-х годов прошлого века. Район входит в зону сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород с температурой от $-2,5^{\circ}$ до $-8,5^{\circ}\text{C}$. Криогенная толща, мощность которой составляет 700–1000 м, имеет трехъярусное строение [11, 12]. Верхний ярус мощностью 180–200 м сложен собственно многолетнемерзлыми горными породами, в трещинах которых лед встречается как отдельный мономинерал [13]. До глубины примерно 480–500 м обводнение дна карьера происходит за счет поступления вод из верхнекембрийского субкриогенного слабодоносного комплекса, залегающего непосредственно под нижней границей ММП. Ниже глубины 500–550 м обводненность карьера резко увеличивается за счет среднекембрийского водоносного комплекса, характеризующегося высокой водообильностью [14].

Практические работы по утилизации дренажных вод способом подземного захоронения были начаты в 1985 г. на Октябрьском полигоне,

расположенном в 3,5 км западнее карьера – на вершине увала Сытыкан-Далдынского междуречья (рис. 1). Разрез многолетнемерзлого яруса горных пород здесь представлен переслаиванием плотных мелкозернистых известняков и доломитов кембрия. По данным специальных гидрогеологических и геофизических исследований было выделено несколько субвертикальных зон дробления горных пород шириной до 200 м и более. В пределах этих зон породы сильно трещиноваты. Трещины вертикальные или наклонные шириной от 0,5 до 15 см и, как правило, заполнены либо чистым льдом, либо смесью обломочного материала со льдом [13].



Рис. 1. Расположение полигонов подземного захоронения рассолов карьера трубки «Удачная» [15]

Проведенными комплексными геолого-гидрогеологическими исследованиями в пределах полигона выявлено 5–6 активных поглощающих горизонтов, приуроченных к интервалу 40–200 м. При этом установлено, что коллекторские свойства вышележащих горизонтов намного выше, чем нижележащих. Это обстоятельство предопределило приоритетное использование коллекторов, залегающих в зоне распространения ММП. Таким образом, впервые в мировой практике криогенная толща стала использоваться в качестве емкости для захоронения отрицательно-температурных рассолов.

Октябрьский полигон эксплуатировался с 1985 по 2002 г. За это время в мерзлую толщу закачено 10640 тыс. м³ дренажных вод [15]. После переполнения полезных подземных емкостей Октябрьского полигона стал эксплуатироваться Киенгский полигон, расположенный в 5–10 км к юго-востоку от карьера трубки «Удачная». Многолетнемерзлая толща данного полигона также сложена карбонатными породами верхнего кембрия и нижнего ордовика. В разрезе преобладают доломиты и их известковистые разности.

На начальном этапе исследований по всей площади междуречья было пробурено более 20 опытных гидрогеологических скважин глубиной около 200 м. По результатам испытаний скважин выбран наиболее благоприятный участок на водораздельной седловине. Еще до ввода Киенгского полигона в эксплуатацию Институтом мерзлотоведения СО РАН были проведены геотермические наблюдения во всех скважинах, что позволило оценить естественное температурное поле мерзлой толщи [16].

Результаты исследования

Использование многолетнемерзлой толщи в качестве коллектора для подземного захоронения низкозамерзающих жидкостей изучено еще недостаточно. Для безопасного использования этого способа утилизации токсичных стоков необходимо постоянное слежение за изменениями теплового поля горных пород. На Октябрьском полигоне регулярные геотермические наблюдения проводились сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН с 1986 г. На основе этих наблюдений была выявлена динамика температурного поля криогенной толщи в процессе захоронения рассолов. В интервале залегания водопоглощающих горизонтов в зависимости от режима сброса рассолов возникают сезонные температурные аномалии, которые характеризуются большими значениями вертикальных и горизонтальных температурных градиентов (рис. 2). Динамика и стабилизация по-

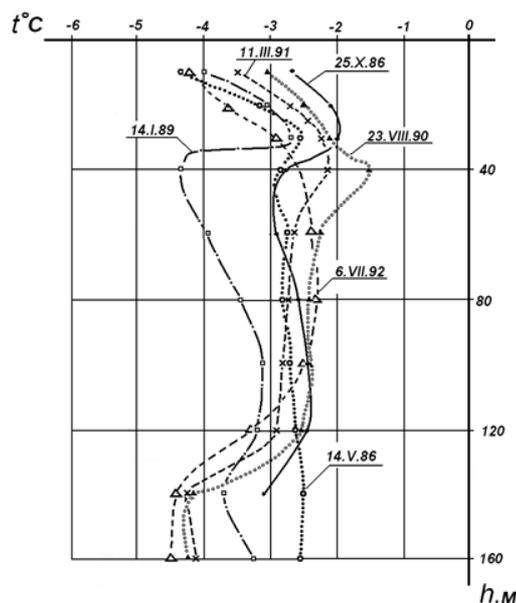


Рис. 2. Характер температурных колебаний в скв. 31, расположенной в центральной части Октябрьского полигона

добных аномалий зависят от режима сброса дренажных вод и особенностей самой мерзлотно-гидрогеологической среды. В связи с этим был сделан вывод о том, что по динамике температурного поля можно качественно оценивать геоструктурные особенности водопоглощающих коллекторов и определять пути подземной миграции рассолов [17–19]. Кроме того, было отмечено, что организация системы геотермического мониторинга многолетнемерзлой толщи должна быть обязательным условием при эксплуатации полигонов подземного захоронения рассолов в условиях криолитозоны [20].

Режимные геотермические наблюдения позволили установить, что на начальном этапе эксплуатации полигонов не отмечалось повышения средней годовой температуры горного массива в зоне поглощающих горизонтов, что подтвердило принципиальную возможность использования криогенной толщи для длительного хранения минерализованных токсичных стоков. Так, за два первые года эксплуатации Октябрьского полигона в этих зонах произошло понижение температуры в среднем на 1,8 °С. В последующем это наблюдалось и при эксплуатации Киенгского полигона, где за первые четыре года температура понизилась почти на 3 °С (рис. 3).

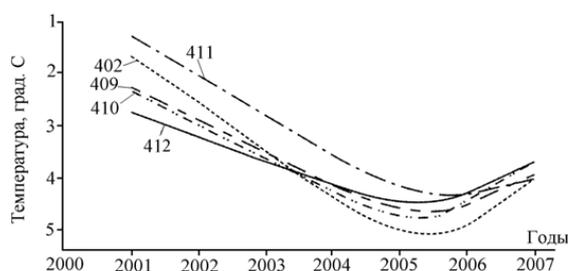


Рис. 3. Динамика температуры горных пород на Киенгском полигоне

Анализ полученных результатов многолетних геотермических наблюдений на полигонах подземного захоронения дренажных вод, откачиваемых из карьера трубки «Удачная», позволил выявить основные особенности температурного поля горных пород. В вертикальном разрезе криогенной толщи выделено три гидрогеотермические зоны (рис. 4).

Первая гидрогеотермическая зона занимает самую верхнюю часть криогенной толщи территории полигона захоронения. Нижняя граница данной зоны фактически лимитируется подошвой слоя годовых колебаний температуры горных пород. Учитывая, что в ходе эксплуатации

полигона непременно будут происходить те или иные нарушения поверхностных условий, мощность зоны принимается равной 25–30 м. В пределах этой зоны температурные наблюдения в скважинах должны проводиться стационарными термодатчиками или температурными логгерами. Изменение температуры горных пород в выделенной зоне характеризует реакцию криогенной толщи на нарушение поверхностных условий в ходе эксплуатации полигонов.

Вторая гидрогеотермическая зона является экологически опасной для захоронения токсичных стоков. Нижняя граница этой зоны должна залегать примерно на 20–25 м ниже отметки межени уровня ближайшего водотока. В ходе эксплуатации полигонов дренажные воды в данную зону не должны поступать, т.е. она должна иметь стабильное температурное поле. Однако в ходе режимных температурных наблюдений в скважинах на Октябрьском полигоне нами часто отмечались значительные температурные колебания горных пород именно в пределах данной зоны, что свидетельствовало о попадании рассолов в экологически опасные горизонты.

Третья гидрогеотермическая зона является непосредственно эксплуатационной. Температурное поле горных пород в данной зоне зависит от режима сброса рассолов. В ходе эксплуатации полигона температура горных пород должна поддерживаться в отрицательных значениях. Это можно достигать путем корректировки режима эксплуатации полигона захоронения, например, регулировать температуру мерзлого массива по изменению объемов сброса рассолов в летнее и зимнее время.

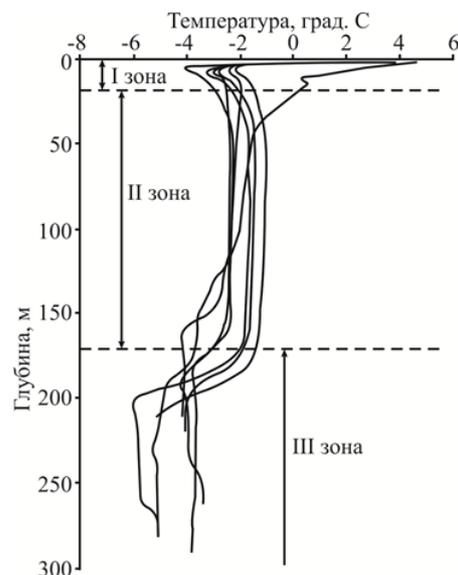


Рис. 4. Расположение гидрогеотермических зон на Киенгском полигоне

Выводы

Таким образом, анализ результатов многолетних наблюдений за динамикой температурного режима многолетнемерзлых горных пород на полигонах захоронения дренажных вод карьера трубки «Удачная» позволил выявить особенности формирования температурного режима криогенной толщи в ходе ее использования в качестве водопоглощающего коллектора. В вертикальном разрезе криогенной толщи выделено три гидрогеотермические зоны, отражающие характер и степень трансформации ее теплового состояния под воздействием закачиваемых дренажных вод.

Выявленные особенности динамики температуры горных пород на полигонах подземного захоронения токсичных стоков в криолитозону могут служить основанием для выбора оптимального режима утилизации дренажных вод и разработки мероприятий по минимизации их негативного воздействия на геологическую среду и экологическую обстановку территории в целом.

Литература

1. Роль рассолов в гидрохимическом режиме рек. Западная Якутия / А.А. Дзюба, Г.М. Шпейзер, В.Н. Борисов и др. – Новосибирск: Наука, 1987. – 85 с.
2. Порохняк А.М., Рассудов А.В. Захоронение жидких отходов в криолитозоне. – М.: Недра, 1993. – 112 с.
3. Сердюков Л.И., Артемьева Е.Л., Строгова Е.В. и др. О природе поглощающей способности многолетнемерзлых пород при захоронении в них дренажных рассолов // Горный журнал. – 1996. – №7–8. – С. 5–12.
4. Алексеев С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И. и др. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки «Удачная» в многолетнемерзлые породы // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI, №2. – С. 61–65.
5. Новик-Качан В.П. Некоторые вопросы подземного захоронения жидких промышленных стоков // Советская геология. – 1965. – №6. – С.122–130.
6. Белицкий А.С. Охрана природных ресурсов при удалении промышленных жидких отходов в недра Земли. – М.: Недра, 1976. – 145 с.
7. Гаев А.Я. Подземное захоронение сточных вод на предприятиях промышленности. – Л.: Недра, 1981. – 167 с.
8. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г. Подземное захоронение промышленных сточных вод. – М.: Недра, 1994. – 282 с.
9. Казаков А.Н., Лобанов Н.Ф., Манькин В.И. Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых породах // Геоэкология. – 1997. – №2. – С. 36–40.
10. Шполянская Н.А., Казаков А.Н. Прогноз эволюции криолитозоны в целях обоснования возможности использования ее для подземной изоляции радиоактивных отходов (на примере архипелага Новая Земля) // Геоэкология. – 1997. – №2. – С. 41–50.
11. Бодунов Е.И., Белецкий В.Л., Фрадкин Г.С. и др. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1986. – 176 с.
12. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Наука, 1994. – 168 с.
13. Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 119 с.
14. Атрощенко Ф.Г. Оценка гидрогеологических условий подземной разработки месторождения трубки «Удачная» // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – М.: Наука, 2012. – №5. – С.414–421.
15. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. – 296 с.
16. Готовцев С.П. Температурное поле мерзлой толщи Киенгского полигона подземного захоронения дренажных вод карьера трубки «Удачная» // Кундэл. – 2003. – №5. – С. 19–26.
17. Дроздов А.В., Готовцев С.П. Особенности миграции рассолов в криолитозоне при их подземном захоронении // Формирование подземных вод криолитозоны. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1992. – С. 31–48.
18. Готовцев С.П., Климовский И.В. Влияние закачки дренажных вод на температуру мерзлых пород // Формирование подземных вод криолитозоны. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1992. – С.93–108.
19. Климовский И.В., Готовцев С.П., Шепелев В.В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки «Удачная» // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI, №3. – С. 45–50.
20. Готовцев С.П., Климовский И.В., Заболотник П.С. Значение режимных геотермических исследований при захоронении криопэггов в мерзлую толщу // Материалы Всерос. совещания по подземным водам востока России. – Иркутск, 1994. – С.91.

Поступила в редакцию 21.05.2015

Транзитно-аккумуляционные особенности неизученных озёр Якутии

М. И. Нестерева

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

Озера, расположенные на многолетнемерзлом субстрате, имеют специфические черты развития режима и водообмена. Однако для подавляющего числа озёр Якутии такие исследования практически не проводились. В связи с этим для определения притока и стока воды в озёрах рассмотрены многолетние водные балансы и рассчитаны приёмы определения их составляющих при отсутствии соответствующих наблюдений. Для этих целей использованы расчёты зависимости $V_0=f(A_0)$ для основных выделенных генетических типов озёрных котловин. Теоретическим путём выявлены транзитно-аккумуляционные особенности неизученных озёр Якутии.

Ключевые слова: озеро, водообмен, водный баланс, транзит, аккумуляция, объем воды, гидрология,

Formula that determines the amount of water for unexplored lakes in Yakutia were obtained on the basis of morphometric and bathymetric data. Using the water balance approach transit-accumulative features of the lakes were identified. It is expected that the work will allow to determine the extent of transit possibilities of unexplored lakes in the studied area for the indirect environmental monitoring of water resources. Most of the examined lakes have no inflow and outflow. Such lakes were attributed to accumulative type. Thermokarst lakes, located in the central part of Yakutia, serve as an example of such lakes. Water balance and water exchange of drainage lakes with identified morphometric parameters were indirectly calculated.

Key words: lake, external water cycle, water balance, transit, accumulation, water amount, hydrology.

Введение

Якутия является территорией повышенной озёрности (более 30% озёр РФ находится на рассматриваемой территории). Целью данной работы является оценка транзитно-аккумуляционных особенностей озёр Якутии при отсутствии данных непосредственных наблюдений. В настоящее время на рассматриваемой территории из 723 тыс. имеющихся озёр изученными являются лишь 500 [1]. Они различаются по происхождению и расположены в различных природных условиях.

Известно, что режим озёр заметно отличается от режима других водных объектов, в первую очередь, рек. Основной причиной таких различий является увеличение времени пребывания воды в озёрных котловинах по сравнению с реками. Озера в этом отношении можно рассматривать как природные аккумуляторы, задерживающие поступающие с водосборов различные вещества как естественные, так и антропогенные. При этом могут происходить заиление и зарастание озёр водной растительностью, изме-

нение трофического статуса водоема, активизация внутриводоемных процессов.

Методы расчёта и анализа водообмена в озёрах в основном разработаны для районов вне криолитозоны [2,3]. Для озёр Якутии такие исследования практически не проводились. Знание интенсивности водообмена [4,5], его изменчивости во времени позволяет решить целый ряд важных гидрологических, водохозяйственных и других задач с учетом того, что озера могут использоваться в хозяйственных целях для водоснабжения и водоотведения, рыбного хозяйства, рекреации, добычи сапропеля, а наиболее крупные озера – для судоходства.

Методика исследования

Пользуясь формулами (табл.1), полученными нами с помощью графиков зависимостей объемов (V) от площадей (A) изученных озёр, приближённо был рассчитан объем воды (V) для неизученных озёр с известными площадями (A).

Существуют ещё несколько методов определения объема воды для неизученных озёр [7], но при этом отмечается высокое среднеквадратическое отклонение, поскольку происхождение озёрных водоёмов различное. Площади водного

НЕСТЕРЕВА Мария Ионовна – инженер-исследователь, perlla84@mail.ru.

ТРАНЗИТНО-АККУМУЛЯЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕР ЯКУТИИ

Т а б л и ц а 1
Формулы для определения объёма воды в озере [6]

Тип котловины	Объем воды (V)
Термокарстовый	$0,0022A^{1,15}$
Водно-эрозионный	$0,0012A^{1,004}$
Эрозионно-термокарстовый	$0,0035A^{1,26}$
Ледниковый	$0,02A^{2,42}$

зеркала озёр определялись нами на основе известных программ 3Planet, MapInfo, ArcGis, а для определения площадей водосборов дополнительно использовалась программа Google Earth. Затем по карте стока [8] вычислялся объём воды в озёрах по притоку. Подземное питание в водном балансе большинства озёр играет малозначительную роль [8], но надмерзлотные воды криолитозоны можно рассматривать как фактор, определяющий физическую сущность процессов промерзания и протаивания горных пород [9]. Далее, пользуясь картами осадков [10] и испарения [11], определялся объём воды в озёрах по стоку. В общем виде уравнение водного баланса озёр для многолетнего периода имеет следующий вид:

$$V_{np} + V_{oc} - V_{cm} - V_{ucn} = \pm V_{np}, \quad (1)$$

где V_{np} – приток поверхностных вод в озеро; V_{oc} – объём атмосферных осадков, выпавших на водную поверхность озера; V_{cm} – поверхностный сток воды из озера по реке; V_{ucn} – объём воды на испарение с поверхности водоема; $\pm V_{np}$ – накопление или расходование воды в озёрной котловине.

При изучении озёр применяется метод оценки времени пребывания воды в котловинах, т.е. определяется оценка интенсивности водообмена [12]. В практике гидрологических расчётов рассматриваются два вида внешнего водообмена: «по притоку» K_6' и «по стоку» K_6'' . Эти коэффициенты могут быть определены из уравнения водного баланса, представленного основными составляющими, и рассчитываются как частное от деления суммы приходных или расходных составляющих водного баланса на объём воды в озере (V_o).

$$K_6' = V_{np}/V_o, \quad (2)$$

$$K_6'' = V_{cm}/V_o, \quad (3)$$

где V_{np} и V_{cm} – соответственно приток и сток воды; V_o – объём воды в озере.

Однако чаще всего, при оценке внутриводоемных процессов, рассчитываются коэффициен-

ты водообмена лишь по стоку. Наличие такого большого разброса значений (K_6'') позволили Б.Б. Богословскому [13] классифицировать озера по интенсивности внешнего водообмена (табл.2).

Т а б л и ц а 2
Классификация водоемов суши по внешнему водообмену

Класс	Водные объекты	Водообмен	
		K_6''	Период времени
Транзитный	Участки рек, малые водохранилища	От 100 до более 300	Часы, сут.
Транзитно-аккумуляционный	Сильнопроточные и проточные озера и водохранилища	10–100	Недели, месяцы
Аккумуляционно-транзитный	Средне- и слабопроточные озера и водохранилища	1–10	Месяцы, сезоны, год
Аккумуляционный	Озера и водохранилища с замедленным водообменом	От 0,1 до менее 1	Годы, десятилетия
	Сточные и бессточные озера с малым и исключительно малым водообменом	От 0,1 до менее 0,03	Десятки, сотни лет

Результаты и обсуждения

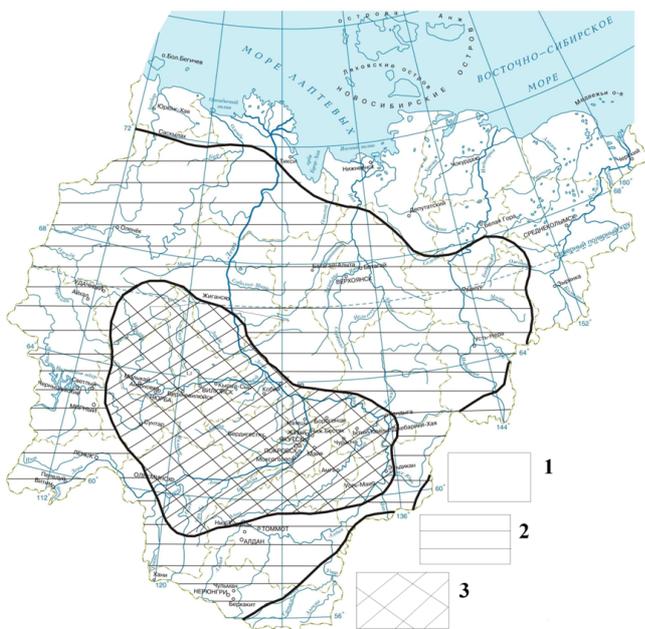
Следуя изложенной выше методике, были определены составляющие водного баланса и внешнего водообмена для 1125 озёр Якутии, имеющих различное происхождение и расположение. В результате 844 непроточных озера были отнесены к аккумуляционному типу, а остальные 281 проточное – к аккумуляционно-транзитному.

Высокие значения коэффициентов K_6' свидетельствуют о связи озера с его водосбором и характеризуют преобладание транзитных вод, а гидрологический режим озера определяется размерами водосборов, площади которых могут во много раз превосходить площади самих водоемов. В этом случае процессы, происходящие в котловинах озёр, относятся к аллохтонным, т.е. внешним (терригенным) процессам. Низкие значения (K_6'') показывают на преобладание аккумуляции воды и веществ, поступающих в озеро. В режиме озёр главное значение имеют внутриводоемные процессы (лимнические, автохтонные). Между транзитными и аккумуляционными озёрами можно выделить промежуточные транзитно-аккумуляционные и аккумуляционно-транзитные озера.

Предварительные расчёты показали, что на территории Якутии могут быть выделены озера всех перечисленных в таблице классов. Авто-

ром была составлена картосхема распространения озёр Якутии на основе проведенной оценки внешнего водообмена 1125 озёр (рисунок). В результате выявлено, что большинство озёр республики относится к аккумуляционному типу. Проточные озера, расположенные на Колымской и Приморской низменностях, в среднем обновляют воду более 3 раз в год и относятся к аккумуляционно-транзитному типу. С учётом избытка водных ресурсов на этих территориях транзитность озёр могла быть больше, если бы не продолжительная зима и короткое лето.

В Центральной Якутии преобладают озера аккумуляционного типа, где водообмен происходит 1 раз в два года и более. В Восточной, Северо-Восточной и Южной Якутии встречаются озера ледникового и тектонического происхождения. Для таких водоёмов возможность транзита озёрных вод возрастает.



Картосхема распределения озёр Якутии по внешнему водообмену: 1 – аккумуляционно-транзитные, сточные ($K_g > 3$); 2 – аккумуляционно-транзитные, периодически сточные ($1 < K_g < 3$); 3 – аккумуляционные, непроточные ($K_g < 1$)

Выводы

Таким образом, выявлено, что в Центральной Якутии сконцентрированы озера преимущественно аккумуляционного типа, а аккумуляционно-транзитные расположены на Приморской и Колымской низменностях и, частично, в восточных, юго-восточных и южных районах Якутии. Транзитный и транзитно-аккумуляционный типы озёр встречаются крайне редко. Это могут

быть водохранилища или проточные озера старичного типа.

Вода в непроточных озёрах слабо обновляется, что может привести их к быстрому заилению и загрязнению. Поэтому расположение населённых пунктов и крупных промышленных объектов на берегах озёр аккумуляционного типа крайне нежелательно, поскольку это может вызвать их загрязнение.

Дальнейшее изучение озёр Якутии имеет многоцелевое значение, в том числе для комплексной типизации континентальных водоёмов по ведущим признакам, определяющим гидрологический и биологический режим озёр и водохранилищ, а также их лимнический тип.

Литература

1. Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М. Реки и озёра Якутии. – Якутск: Бичик, 2007. – 133 с.
2. Исмаилов Г.Х., Перминов А.В. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли, водный кадастр и мониторинг водных объектов. – М.: МГУП, 2013. – 324 с.
3. Карнацевич И.В., Акимова В.С. Гидрологические расчёты неизученных рек Сибири по данным метеонаблюдений. – Омск: Изд-во СибГУФК, 2014. – 103 с.
4. Догановский А.М. Исследование возможности обобщения данных по водному балансу внутренних водоёмов // Сборник работ по гидрологии. – СПб.: РГМУ, 1982. – №17. – С. 172–179.
5. Сорокин И.Н. Внешний водообмен озёр СССР. – Л.: Наука, 1988. – 144 с.
6. Нестерева М.И. Пространственные особенности разнотипных озерных котловин на территории Якутии // Общество. Среда. Развитие. – СПб.: Астерион, 2011. – №4. – С. 227–230.
7. Сало Ю.А., Потахин М.С., Толстиков А.В. Расчет средней глубины озера при отсутствии батиметрических данных на примере водоемов Карелии // География: Проблемы науки и образования. LXIII Герценовские чтения. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2010. – С. 410–413.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индигирский район. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – Т.17. – 651 с.
9. Шенелёв В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2011. – 167 с.
10. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989. – 115 с.
11. Постников А.Н. Приближённый метод

оценки испарения с озёр и водохранилищ // Учёные записки. – СПб.: РГМУ, 2014. – С. 22–29.

12. Эдельштейн К.К. Гидрология озёр и водохранилищ. – М.: Перо, 2014. – 400 с.

13. Богословский Б.Б. О водообмене и водных массах водных объектов // Круговороты вещества и энергии в озёрных водоемах. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 270–275.

Поступила в редакцию 14.07.2015

УДК 622.4:551.4

Возможности решения некоторых инженерных задач горного дела в криолитозоне с помощью граничного метода

Ф.М. Федоров^{*}, А.И. Матвеев^{**}

^{*}Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

^{**}Институт горного дела Севера СО РАН, г. Якутск

На примере трех типичных задач математической физики и их вариаций, часто возникающих при освоении месторождений в зоне Арктики, показана возможность успешного применения граничного метода решения прикладных задач математической физики. Первый тип задач посвящен прикладному решению нелинейной тепловой задачи с целью определения теплофизических характеристик мерзлых, талых и протаивающих-промерзающих горных пород. Второй тип относится к задаче абляции-плавления твердых материалов применительно к мерзлым труднопромывистым глинистым горным породам для их наиболее полного диспергирования с целью эффективного извлечения тонких классов полезного компонента. Третий тип задач относится к задаче течения ламинарного пограничного слоя вдоль поверхности магнитной поверхности с целью извлечения тонких классов немагнитных компонентов полезных ископаемых: золото, платина, олово и т.д. Предложены простые решения всех этих задач.

Ключевые слова: труднопромывистые мерзлые и талые породы, незамерзшая вода, задача абляции-плавления, магнитный шлюз.

On the example of three typical tasks of mathematical physics and their variations that often arise during the development of oil fields in the Arctic area, the possibility of successful application of frontier methods of solving applied problems of mathematical physics. The first type of tasks is dedicated to application of solutions of the nonlinear thermal problem to determine the thermal characteristics of frozen, thawed and thawing - freezing rocks. The second type of the tasks is related with the problems of ablation - the melting of solids applied to frozen hard disintegrating clay rocks for their most complete dispersion in order to effectively recover fine fractions of the useful component. The third type of problems refers to the tasks of the laminar boundary layer flow along the magnetic surface for extraction of thin non-magnetic component classes of minerals: gold, platinum, tin, and others. Simple solutions of all these problems are proposed.

Key words: hard disintegrating frozen and thawed rocks, unfrozen water, task of ablation, melting, magnetic lock.

Введение

В монографии [1] автором предложен новый аналитический метод решения дифференциальных уравнений в частных производных с крайними условиями, названный граничным мето-

дом. Название метода обусловлено прежде всего тем, что искомое решение удовлетворяет (естественно, в предельном смысле) исходному дифференциальному уравнению в граничных точках. При этом решение ищется в виде степенного ряда по пространственной координате для нестационарных задач.

Естественно такой подход требует, на первый взгляд, существенно ограничивающее для применения условие аналитичности, хотя бы по

^{*} ФЕДОРОВ Фома Михайлович – д.ф.-м.н., г.н.с., foma-46@mail.ru; ^{**} МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич – д.т.н., зав. лаб., andrei.mati@yandex.ru.

оценки испарения с озёр и водохранилищ // Учёные записки. – СПб.: РГМУ, 2014. – С. 22–29.

12. Эдельштейн К.К. Гидрология озёр и водохранилищ. – М.: Перо, 2014. – 400 с.

13. Богословский Б.Б. О водообмене и водных массах водных объектов // Круговороты вещества и энергии в озёрных водоемах. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 270–275.

Поступила в редакцию 14.07.2015

УДК 622.4:551.4

Возможности решения некоторых инженерных задач горного дела в криолитозоне с помощью граничного метода

Ф.М. Федоров^{*}, А.И. Матвеев^{**}

^{*}Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

^{**}Институт горного дела Севера СО РАН, г. Якутск

На примере трех типичных задач математической физики и их вариаций, часто возникающих при освоении месторождений в зоне Арктики, показана возможность успешного применения граничного метода решения прикладных задач математической физики. Первый тип задач посвящен прикладному решению нелинейной тепловой задачи с целью определения теплофизических характеристик мерзлых, талых и протаивающих-промерзающих горных пород. Второй тип относится к задаче абляции-плавления твердых материалов применительно к мерзлым труднопромывистым глинистым горным породам для их наиболее полного диспергирования с целью эффективного извлечения тонких классов полезного компонента. Третий тип задач относится к задаче течения ламинарного пограничного слоя вдоль поверхности магнитной поверхности с целью извлечения тонких классов немагнитных компонентов полезных ископаемых: золото, платина, олово и т.д. Предложены простые решения всех этих задач.

Ключевые слова: труднопромывистые мерзлые и талые породы, незамерзшая вода, задача абляции-плавления, магнитный шлюз.

On the example of three typical tasks of mathematical physics and their variations that often arise during the development of oil fields in the Arctic area, the possibility of successful application of frontier methods of solving applied problems of mathematical physics. The first type of tasks is dedicated to application of solutions of the nonlinear thermal problem to determine the thermal characteristics of frozen, thawed and thawing - freezing rocks. The second type of the tasks is related with the problems of ablation - the melting of solids applied to frozen hard disintegrating clay rocks for their most complete dispersion in order to effectively recover fine fractions of the useful component. The third type of problems refers to the tasks of the laminar boundary layer flow along the magnetic surface for extraction of thin non-magnetic component classes of minerals: gold, platinum, tin, and others. Simple solutions of all these problems are proposed.

Key words: hard disintegrating frozen and thawed rocks, unfrozen water, task of ablation, melting, magnetic lock.

Введение

В монографии [1] автором предложен новый аналитический метод решения дифференциальных уравнений в частных производных с крайними условиями, названный граничным мето-

дом. Название метода обусловлено прежде всего тем, что искомое решение удовлетворяет (естественно, в предельном смысле) исходному дифференциальному уравнению в граничных точках. При этом решение ищется в виде степенного ряда по пространственной координате для нестационарных задач.

Естественно такой подход требует, на первый взгляд, существенно ограничивающее для применения условие аналитичности, хотя бы по

^{*} ФЕДОРОВ Фома Михайлович – д.ф.-м.н., г.н.с., foma-46@mail.ru; ^{**} МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич – д.т.н., зав. лаб., andrei.mati@yandex.ru.

пространственной координате искомого решения. Однако еще О.Коши первым обратил внимание на замечательное свойство некоторых дифференциальных уравнений в частных производных, состоящее в том, что все их решения аналитичны, этот факт он доказал для эллиптических уравнений с постоянными коэффициентами. Пикар методом последовательных приближений показал, что указанным свойством обладают некоторые дифференциальные уравнения, коэффициенты которых аналитичны по x и t . Для эллиптических уравнений более общего вида с аналитическими коэффициентами наличие данного свойства доказал С. Н. Бернштейн [2]. Он же указал, что таким же свойством обладают и параболические уравнения, решение которых аналитичны по пространственной координате. В современных исследованиях такого типа изучаются даже вырождающиеся уравнения, например, эллиптические [3]. Кроме того, доказательство некоторой гладкости решения дифференциальных уравнений стало почти необходимым атрибутом.

Итак, пусть решение некоторого дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими краевыми и начальными условиями ищется в виде степенного ряда по пространственной координате x :

$$u(x,t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t)x^i, \quad (1)$$

где $a_i(t)$ – искомые коэффициенты.

Ясно, что для определения всех коэффициентов $a_i(t)$ необходимо наличие бесконечного числа условий, а в действительности имеем только два краевых условия (в случае одномерных по пространственной координате задач).

В соответствии с граничным методом, дифференцируя бесконечное число раз краевые условия по t и используя основное уравнение, заменяем производные по t в краевых условиях производными по пространственной координате (в предельном смысле) в граничных точках. Таким образом, получим бесконечное число недостающих дополнительных условий. Подставляя степенной ряд (1) в исходные краевые условия, а также во вновь полученные дополнительные условия, получим бесконечную систему алгебраических уравнений: для линейных задач – линейную бесконечную систему, а для нелинейных – нелинейную. Поскольку бесконечное число раз дифференцируем по x степенной ряд

(1), то эти бесконечные системы часто имеют более простой, во-первых, так называемый гауссовый вид [4], т. е. все элементы матрицы системы a_{ij} при $i > j$ равны нулю ($a_{ij} = 0$). Во-вторых, коэффициенты a_{ij} системы имеют особую структуру:

$$\frac{a_{j,j+p}}{a_{j+p,j+p}} = a_p \quad \forall j,$$

и бесконечные системы с такими коэффициентами названы периодическими системами [5]. Исследования таких систем изложены автором, в частности, в работах [4,6]. Таким образом, найдя решение бесконечных систем, находим точное решение исходной краевой задачи.

Вместе с тем аппарат граничного метода является достаточно эффективным способом получения приближенных с необходимой точностью простых по форме решений краевых задач практически любой сложности, лишь бы искомое решение имело достаточную гладкость. Необходимая точность приближенного решения (функции) достигается тем, что не только сама искомая функция (приближенное решение) в двух крайних точках рассматриваемой области принимает точное значение, но и соответствующие производные вплоть до бесконечного порядка (если ищем точное решение) принимают точные значения в этих крайних точках.

Рассмотрим некоторые типы модельных задач, которые с успехом могут найти свое применение при освоении северных территорий. Приводим приближенное решение этих задач, полученных граничным методом.

Нелинейные задачи теплопроводности и диффузии

Пусть задано следующее нелинейное уравнение теплопроводности (диффузии):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 0 < x < \infty, t > 0, \quad (2)$$

с начальными условиями

$$T(\infty, t) = T(x, 0) = 0 \quad (3)$$

и с одним из трех краевых условий

$$T(0, t) = T_n, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = q, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \alpha(T(0, t) - T_c). \quad (6)$$

Причем $\lambda(T)$ – произвольная заданная функция по T такая, что $(\lambda(T))_{x=0} \neq 0$.

Приближенное решение задачи (2)–(4) для краевого условия (4), полученное граничным методом, приведено в [1], причем для $T_n=1$ имеем

$$T = \left(1 - \frac{x}{R}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{\lambda_0} \left(2 + \bar{\lambda}_0 - \sqrt{4 + 6\bar{\lambda}_0}\right) \frac{x}{R} + 1 \right] \quad (7)$$

$$R = 2\sqrt{\frac{2\lambda_0(\sqrt{4+6\bar{\lambda}_0}-1)t}{1+2\bar{\lambda}_0}}, \quad (8)$$

где $R=R(T)$ – радиус теплового влияния,

$$\bar{\lambda}_0 = \frac{\lambda_0'}{\lambda_0}; \quad \lambda_0 = \lambda(T_n); \quad \lambda_0' = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T}\right)_{x=0}.$$

В работе [1] также приведено сравнение решения (7)–(8) с точными решениями при

$$\lambda = \frac{\chi_0}{1-\alpha T}; \quad \lambda = \frac{\chi_0}{(1-\alpha T)^2}; \quad \lambda = (1+\alpha T) \chi_0, \quad (9)$$

которое показывает достаточную точность формул (7)–(8) для широкого диапазона изменения исходных параметров.

Видно, что уравнение (2) с учетом (9) является существенно нелинейным уравнением. При освоении северных территорий, особенно при строительстве различных зданий, автодорог и т. д. на зоне распространения вечной мерзлоты, значительную роль играет прогноз морозного пучения сезонно-промерзающих грунтов. Исследование этой проблемы приводит к решению существенно нелинейных уравнений тепло- и массопереноса, поскольку основной характеристикой этого процесса является количество незамерзшей влаги $W(T)$, имеющее по экспериментальным данным, например, вид [5]:

$$W(T) = \begin{cases} a+b\left(\frac{1}{1-c(T+d)}-1\right), & T \leq -d, \\ a_1+b_1T, & -d \leq T \leq 0, \end{cases}$$

где $a=a_1-bd$. При этом $W(T)$ связано со льдосодержанием $W_1(T)$ в мерзлой зоне и с количеством влаги $W_0(T)$ в талой зоне уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_2(W_0, T) \frac{\partial W}{\partial T} \right), \quad (10)$$

где W – количество незамерзшей влаги; W_1 – льдосодержание; W_0 – количество влаги в талой зоне; $k_2(W_0, T)$ – коэффициент диффузии в мерзлой зоне.

Следовательно, уравнение (10), которое решается совместно с обычным уравнением теплопроводности, является существенно нелинейным и может быть успешно решено по аналогии с задачей (2) – (4) граничным методом.

Исследование широкого круга проблем освоения Севера основано на изучении процессов тепло- и массопереноса в промерзающих–протаивающих средах, математическое моделирование которых включает уравнения типа (10).

Расчет динамики протаивания с дезинтеграцией высокоглинистых мерзлых пород

Пусть решается однофазная задача с подвижной границей $\xi(t)$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \xi(t), \quad t > 0, \quad (11)$$

$$T(\xi t) = \varphi_1(t), \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\xi} = \varphi_2(t), \quad (13)$$

$$T(x, 0) = \varphi_0(x), \quad (14)$$

а на границе $x=0$ задано одно из условий (4)–(6).

Общее решение задачи (11)–(13), полученное граничным методом для произвольных функций $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$, приведено в работе [1], которое для частного случая, когда $\varphi_1(t) = T_\phi = \text{const}$ имеет вид:

$$T(x, t) = T_\phi - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\chi^n (2n+1)! \partial x^n} \left[\varphi_2(t) (\xi-x)^{2n+1} \right], \quad (15)$$

где $\xi(t)$ – неизвестный параметр. Для определения $\xi(t)$ используется одно из условий (4)–(6). В соответствии с граничным методом, если, например, задано условие (4), то дополнительными условиями являются выражения:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{x=0} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

Пусть

$$\varphi_2(t) = -\frac{G_\phi}{\lambda} \xi',$$

тогда при $n=1$, подставляя (15) в (4) и (16), получим систему двух уравнений относительно ξ' и ξ'' . Решив данную систему, найдем

$$\xi = \sqrt{3\chi \left(\sqrt{1 + \frac{4\lambda T_n}{3\chi G_\phi}} - 1 \right) t}. \quad (17)$$

Сравнение решения (17) с точным решением приведено в [1], которое показывает достаточную точность.

Математическая модель типа (11) – (14) может быть использована при исследовании искусственного оттаивания как одного из важнейших этапов технологического цикла при разработке россыпных месторождений полезного ископаемого, расположенного в области многолетнемерзлых пород, в частности, при разработке труднопромывистых глинистых песков в режиме абляции, т. е. в режиме непрерывного обнажения фронта оттаивания мерзлых пород. В данном случае

$$\varphi_1(t)=0, \quad \varphi_2(t)=\frac{G_\phi \xi'}{\lambda} - \frac{q}{\lambda},$$

$$T(R)=-T_M, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=R}=0,$$

где q – тепловой поток на обнаженной поверхности породы; $R=R(t)$ – радиус теплового влияния; $\xi=\xi(t)$ – глубина протаивания; T_M – начальная температура мерзлой породы (абсолютная).

Для этой задачи упрощенным вариантом граничного метода получено следующее выражение:

$$\xi(t)=\frac{qt}{\rho c T_M + G_\phi}, \quad (18)$$

где ρ – плотность мерзлой породы; c – удельная теплоемкость мерзлой породы.

Тепловой поток q в мерзлые горные породы определяется из соотношения теплового баланса на поверхности обнажения подобно работе [7].

При таком способе искусственного оттаивания мерзлых глинистых пород наилучшим образом решаются две основные задачи: во-первых, достигается максимальная скорость оттаивания, что следует из формулы (18), кроме того, за счет непрерывного обнажения мерзлой породы максимально аккумулируется тепло солнечной радиации; во-вторых, если непрерывное обнажение мерзлой поверхности осуществляется дождеванием, то происходит наилучшая дезинтеграция мерзлых глинистых пород из-за водной эрозии.

Обогащение тонких классов тяжелых полезных ископаемых

Пусть заданы стационарные уравнения Прандтля для плоского пограничного слоя с учетом влияния магнитной вязкости [7]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{(\mu_n + \mu_m)}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (20)$$

со стандартными граничными условиями

$$u(x,0)=v(x,0)=0, \quad (21)$$

$$u(x,\infty)=U(x), \quad (22)$$

где μ_n, μ_m – коэффициенты, соответственно, молекулярной и магнитной вязкости суспензии.

Численное решение задачи (19)–(22) традиционными методами конечных разностей встречает определенные трудности, вместе с тем, данная задача решается граничным методом довольно просто и достаточно точно. В соответствии с граничным методом решения $u(x,y)$ и $v(x,y)$ ищутся в виде степенных рядов:

$$u(x,y) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x) \left(\frac{y}{\delta}\right)^i, \quad (23)$$

$$v(x,y) = \sum_{i=0}^{\infty} b_i(x) \left(\frac{y}{\delta}\right)^i, \quad (24)$$

где $\delta=\delta(x)$.

Если в рядах (23), (24) ограничиться восемью членами, то получим:

$$a_0 = a_3 = 0, \quad a_1 = \frac{60\mu(7U - 2a_2\delta^2)}{(240\mu - b_2\delta^3)}, \quad a_2 = -\frac{UU'}{2\mu};$$

$$a_4 = (35U - 20a_1\delta - 10a_2\delta^2),$$

$$a_5 = (-84U + 45a_1\delta + 20a_2\delta^2),$$

$$a_6 = (70U - 36a_1\delta - 15a_2\delta^2),$$

$$a_7 = (-20U + 10a_1\delta + 4a_2\delta^2);$$

$$b_0 = b_1 = b_4 = 0, \quad b_2 = -\frac{3b_3}{5} - U' \delta,$$

$$b_3 = \frac{\delta^3}{6\mu} (U'^2 + UU'');$$

$$b_5 = -\frac{6b_3}{5} + U' \delta, \quad b_6 = b_3 - U' \delta$$

$$b_7 = -\frac{9b_3}{35} + \frac{2U' \delta}{7}, \quad (25)$$

где $\mu = \frac{\mu_n + \mu_m}{\rho}$.

Если предположить, что $U(x)=const$, то профиль скорости $u(x,y)$ будет иметь вид:

$$u(x,y) = \frac{7Uy}{4\delta(x)} - \frac{2Uy^5}{4\delta^5(x)} + \frac{7Uy^6}{\delta^6(x)} - \frac{5Uy^7}{2\delta^7(x)}. \quad (26)$$

Тогда из интеграла теплового баланса определяем:

$$\delta(x) = \sqrt{32,2v \frac{x}{U}}. \quad (27)$$

Зная величину $\delta(x)$, можно вычислить: а) толщину вытеснения $\delta_1(x) = 0,313\delta(x)$; б) толщину потери импульса $\delta_2(x) = 0,116\delta(x)$; в) толщину потери энергии $\delta_3(x) = 0,179\delta(x)$.

Известен способ обогащения тонких классов тяжелых полезных ископаемых (золота, платины, олова и т. д.) на магнитных шлюзах, т. е. на магнитных осадительных поверхностях. В начальной стадии работы магнитного шлюза формируется длинноцепочная структура из сфлукулированных ферромагнитных частиц, через этот слой фильтруется пульпа, оставляя в нем концентрат тяжелых немагнитных металлов (золота, платины, олова и т. д.). На второй стадии работы шлюза, т. е. после насыщения сгенерированного слоя ферромагнитными частицами, над этим слоем медленно начинает течь вместо с пульпой ламинарный пограничный слой сфлукулированных частиц в силу уменьшения напряженности магнитного поля, унося с собой концентрат тяжелых минералов (в том числе немагнитных). Следовательно, этот процесс можно описать уравнениями (19)–(20) с граничными условиями (21), приближенное решение которых имеет вид (25). Сравнение точности решений (26)–(27) для частного случая $U(x) = \text{const}$ показывает достаточно хорошую точность [7].

Выводы

Таким образом показано, что три типа совершенно разных задач и их вариации, труднореализуемые обычными численными методами, могут быть решены довольно просто и достаточно точно граничным методом.

Известно, что для большинства типичных дисперсных материалов (песок, суглинки, глина) в зоне криолитозоны количество незамерзшей воды зависит от температуры. Для определения теплофизических характеристик этих материалов необходимо решить прямую и обратную нелинейную тепловую задачу (2)–(6), прямое приближенное решение которой найдено (7)–(8) с достаточной точностью.

С целью максимальной скорости оттаивания мерзлых глинистых пород и их максимальной эффективности диспергирования могут быть предложены различные способы искусственного оттаивания мерзлых пород с непрерывным снятием талого слоя. В этом случае исследуемое явление сводится к решению задачи абляции–плавления твердого вещества с полным удалением жидкой фазы. Приведены простые расчетные формулы данного процесса.

Одним из наиболее перспективных направлений по наиболее полному извлечению тонких классов ценных компонентов из труднопромывистых глинистых пород является использование технологических возможностей методов полиградиентной сепарации на магнитных осадительных поверхностях. В этом случае может образоваться ламинарный пограничный слой сфлукулированных частиц, который медленно течет вдоль осадительной поверхности и уносит с собой концентрат тяжелых минералов (в том числе немагнитных: золото, платина, олово и т. д.). Приведены простые расчетные формулы расчета параметров этого пограничного слоя.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания (проект №3047).

Литература

1. Федоров Ф.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 2000.
2. Бернштейн С.Н. Собрание сочинений. Т. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1952.
3. Янушаускас А. Аналитическая теория эллиптических уравнений. – Новосибирск: Наука, 1979.
4. Федоров Ф.М. Периодические бесконечные системы линейных алгебраических уравнений. – Новосибирск: Наука, 2009.
5. Степанов А.В. Тепломассообменные свойства техногенных грунтов криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2011.
6. Федоров Ф.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики и его приложения в геомеханике: Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. – Новосибирск, 2002.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.

Поступила в редакцию 24.06.2015

Математическое моделирование процессов тепломассообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шахт и рудников криолитозоны

Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко

Институт горного дела Севера СО РАН, г. Якутск

Разработана математическая модель процессов тепломассообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных горных выработках шахт и рудников криолитозоны с учетом испарения и конденсации влаги. Принятым допущением массив горных пород вокруг выработки представляем областью в виде полого цилиндра. Внутренний радиус области соответствует радиусу выработки, а внешний радиус выбирается из условия распространения зоны теплового влияния вокруг выработки на расчетный временной период. Математическая модель численно реализована методами конечных разностей. Показано, что летом в устьевых частях горной выработки преобладают конденсационные процессы, а зимой – испарительные. Поступающая в неё влага из вентиляционного воздуха и горного массива интенсифицирует тепломассообменные процессы, что существенно влияет в целом на тепловой режим шахт и рудников. Численная реализация разработанной модели позволяет рассчитать динамику изменений температуры вентиляционного воздуха и его относительной влажности в зависимости от термовлажностных условий выработки, что важно для прогноза теплового режима шахты и обеспечения безопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: тепломассообмен, горная выработка, математическая модель, испарение, конденсация, криолитозона.

Mathematical model of ventilation air and rocks heat mass exchange processes in cryolithozone extensive mine workings, with moisture vaporization and condensation taken into account, is developed. Rock mass around the working by taken assumption is considered in the shape of hollow cylinder. Internal radius of the area corresponds to working's radius, while outer radius is taken from spreading condition of heat influence zone around the working for taken temporal period. The mathematical model is numerically solved by finite difference method. It is shown, that in mine workings' mouth parts in summer period condensation processes prevail, while vaporizing in winter period. Moisture from ventilation air and rock mass getting into it, makes heat mass processes intensify, that significantly affect the mines thermal conditions as a whole. The developed model numerical implementation allows to calculate ventilation air temperature and it's relative humidity variations dynamics subject to working's hydrothermal conditions, that is important to mines thermal conditions prognosis and mining safety providing.

Key words: heat and mass transfer, mining, mathematical model, evaporation, condensation, cryolithozone.

Введение

Значительная часть шахт и рудников Севера эксплуатируется в сложных гидрогеологических условиях, когда фильтрация подземных (рудничных) вод в трещиновато-пористых горных породах приводит к большим притокам их в горные выработки. Водопритоки влияют на температурные и влажностные условия в горных выработках, прогноз их динамики является важным условием обеспечения безопасных и комфортных условий труда горнорабочих.

Необходимо отметить, что прогноз тепловых и влажностных условий в выработках относится к одной из сложных задач горной теплофизики, поскольку процесс теплообмена зависит от множества факторов: изменений температуры горных пород вокруг выработок, их влажности, происходящих массообменных процессов, годовой динамики температуры воздуха, скорости вентиляционной струи, термического сопротивления крепи и т.д.

К настоящему времени разработано значительное количество методов расчета тепловых условий в горных выработках в зависимости от многообразия природных и технологических условий, тем не менее развитие их продолжается, что связано, прежде всего, с успехами вы-

ХОХОЛОВ Юрий Аркадьевич – д.т.н., в.н.с., khokholov@igds.ysn.ru; КУРИЛКО Александр Сергеевич – д.т.н., зав. лаб., a.s.kurilko@igds.ysn.ru.

числительной математики и уровнем развития ЭВМ. Рассматриваемая тепловая задача относится к классу сопряженных задач, поскольку происходит тепловое взаимодействие двух сред – воздушного потока и массива горных пород.

Прогноз температурного и влажностного режимов сети выработок шахты складывается из совокупности решений отдельных задач теплообмена в каждой выработке сети. В этой связи большое значение имеет разработка математической модели тепломассообмена вентиляционной струи с окружающим горным массивом для одиночной выработки. Летом в её устьевых частях преобладают конденсационные процессы, а зимой – испарительные. Поступающая в неё влага из массива интенсифицирует тепломассообменные процессы, что существенно влияет в целом на тепловой режим шахт и рудников [1–3].

Материалы и методы исследования

Рассматриваемый массив горных пород вокруг выработки представляет собой область в виде полого цилиндра. Внутренний радиус соответствует радиусу выработки R_e , а внешний радиус R_c выбирается из условия распространения зоны теплового влияния вокруг выработки на расчетный временной период. Длина области равняется длине выработки. Поскольку рассматриваемая задача является осесимметричной, исходная область сводится к двумерной области. Уравнение сохранения энергии в выработке с учетом фазовых переходов влаги и наличия местных источников тепла имеет вид:

$$(c_e \rho_e + c_n \rho_n) \left(\frac{\partial T_e}{\partial t} + v \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) = \frac{2\alpha}{R_e} (T_{cm} - T_e) + r \cdot J + \frac{q}{\pi R_e^2}, \quad 0 < x \leq L, \quad (1)$$

где T_e – температура воздуха в выработке, °С; v – скорость воздуха в выработке, м/с; t – время, с; α – коэффициент теплообмена между рудничным воздухом и стенками выработки, Вт/(м²·К); c_n, c_e – соответственно удельные теплоемкости пара и сухого воздуха, Дж/(кг·К); ρ_n, ρ_e – соответственно удельный вес пара и сухого воздуха, кг/м³; T_{cm} – температура стенки выработки, °С; r – теплота фазового перехода пар–вода, Дж/кг; J – скорость фазового перехода пар–вода, кг/(м³·с); q – тепловыделения, поступающие в шахтную атмосферу из различных источников тепла, расположенных в выработке, Вт/м; x – продольная координата, м.

Водяной пар находится в воздухе при незначительных парциальных давлениях и близок по своим свойствам к идеальному газу. Основной

особенностью влажного воздуха является то, что количество водяного пара в смеси с сухим воздухом не может превышать определенной величины, которая зависит от давления и температуры. В соответствии с законом Дальтона для газовых смесей общее давление влажного атмосферного воздуха составляет [4]:

$$p = p_e + p_n, \quad (2)$$

где p_e и p_n – соответственно парциальные давления сухого воздуха и водяного пара, Па.

Для расчета плотности пара и сухого воздуха воспользуемся уравнением состояния для идеальных газов [4]:

$$\rho_n = \frac{p_n}{R_n (T_e + 273,15)}, \quad (3)$$

$$\rho_e = \frac{p_e}{R_e (T_e + 273,15)}, \quad (4)$$

где R_n – газовая постоянная пара, равная 461,66 Дж/(кг·К); R_e – газовая постоянная сухого воздуха, равная 287,04 Дж/(кг·К).

При численных расчетах для удобства будем использовать зависимость парциального давления пара в насыщенном воздухе от его температуры, полученную путем регрессионного анализа табличных значений:

$$p_n = 600,36 \cdot \exp(0,0777 \cdot T_e). \quad (5)$$

Вентиляционный воздух в выработку поступает с определенной температурой и относительной влажностью. Если температура воздуха в выработке станет ниже, чем температура точки росы, то будет происходить конденсация паров. Скорость конденсации влаги определяется из уравнения неразрывности:

$$J = - \frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \frac{\partial (\rho_n v)}{\partial x}. \quad (6)$$

Для численной реализации преобразуем уравнение (6):

$$\begin{aligned} J &= - \frac{\partial \rho_n}{\partial t} - v \frac{\partial \rho_n}{\partial x} - \rho_n \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial \rho_n}{\partial T_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} - \\ &v \frac{\partial \rho_n}{\partial T_e} \frac{\partial T_e}{\partial x} - \rho_n \frac{\partial v}{\partial x} = \\ &= - \frac{\partial \rho_n}{\partial T_e} \left(\frac{\partial T_e}{\partial t} + v \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - \rho_n \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнение (3) подставим зависимость давления пара в насыщенном воздухе от температуры:

$$\rho_n = \frac{600,36 \cdot \exp(0,0777 \cdot T) \cdot \varphi}{R_n (T_e + 273,15)}, \quad (8)$$

где φ – относительная влажность воздуха, доли ед.

Отсюда находим:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial T_g} = \frac{600,36 \cdot \exp(0,0777 \cdot T_g)}{R_n (T_g + 273,15)^2} \cdot \varphi \cdot [0,0777 \cdot (T_g + 273,15) - 1] \quad (9)$$

Формула для расчета скорости конденсации влаги имеет вид:

$$J = - \frac{600,36 \cdot \exp(0,0777 \cdot \theta)}{R_n (\theta + 273,15)^2} \cdot \varphi \cdot [0,0777 \cdot (T_g + 273,15) - 1] \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) - \frac{600,36 \cdot \exp(0,0777 \cdot T_g) \cdot \varphi}{R_n (T_g + 273,15)} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (10)$$

В данной формуле при постоянной скорости вентиляционного воздуха по длине выработки вторым членом можно пренебречь. Таким образом, уравнение сохранения энергии в выработке с учетом (1) примет вид:

$$C_{\phi} \cdot \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + v \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) = \frac{2\alpha}{R_g} (T_{cm} - T_g) + \frac{q}{\pi R_g^2}, \quad (11)$$

$$0 < x \leq L,$$

где C_{ϕ} – объемная эффективная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Объемная эффективная теплоемкость воздуха рассчитывается с учетом влажности и температуры по формуле:

$$C_{\phi} = c_g \rho_g + (c_n + r \cdot n_1) \cdot \rho_n, \quad (12)$$

где n_1 – коэффициент, зависящий от температуры, 1/°С.

Коэффициент n_1 учитывает зависимость влагосодержания, насыщенного водяными парами воздуха, от его температуры и рассчитывается с учетом зависимости парциального давления пара в насыщенном воздухе от температуры воздуха (9) и формулы (10):

$$n_1 = \frac{0,0777 \cdot (T_g + 273,15) - 1}{T_g + 273,15} \quad (13)$$

Относительную влажность воздуха определяем по формуле:

$$\varphi = \frac{100 \cdot p_n}{p_{нас}}, \quad \% \quad (14)$$

где $p_{нас}$ – плотность пара при полном насыщении, Па.

Как известно, при появлении в горных выработках водопритоков при определенных термодинамических условиях происходит испарение влаги с их поверхностей. Уравнение неразрывности для расчета плотности пара с учетом испарительных процессов имеет вид:

парительных процессов имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + v \frac{\partial \rho_n}{\partial x} = \frac{2\beta}{R_g} (\rho_{cm} - \rho_n), \quad (15)$$

где ρ_{cm} – плотность пара при полном влагонасыщении на поверхности стенки выработки, кг/м³; β – коэффициент массообмена, который рассчитывается из соотношения Льюиса, м/с [5]:

$$\beta = \frac{\alpha}{(c_g \rho_g + c_n \rho_n)} \quad (16)$$

Процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается следующим двумерным уравнением теплопроводности [6, 7]:

$$\left[C(T) + L_{\phi} \cdot \omega \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left[\lambda(T) \cdot R \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (17)$$

$$0 \leq x \leq L, R_g < R < R_c,$$

$$C = \begin{cases} c_1 \rho_1; & T < T^*; \\ c_2 \rho_2; & T > T^*. \end{cases} \quad (18)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1; & T < T^*; \\ \lambda_2; & T > T^*, \end{cases} \quad (19)$$

где T – температура горных пород, °С; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород; L_{ϕ} – скрытая теплота фазовых переходов поровой влаги, Дж/кг; ω – весовая влажность пород (в долях ед.); T^* – температура фазовых переходов, °С; $\delta(T - T^*)$ – дельта-функция Дирака, 1/К; R – радиальная координата, м.

Систему уравнений (11), (15) и (17) для замыкания необходимо дополнить граничными и начальными условиями. В начальный момент времени обычно задается распределение температур в выработке и плотности пара, а также температур в окружающем массиве пород:

$$T_g = \tilde{\varphi}(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (20)$$

$$\rho_n = \tilde{\varphi}_1(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (21)$$

$$T = \tilde{\psi}(x, R), \quad 0 \leq x \leq L, R_g \leq R \leq R_c. \quad (22)$$

На границе выработки задается граничное условие III рода:

$$\alpha(T_{cm} - T_g) = \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_g} \quad (23)$$

На внешней границе области температура принимается равной естественной температуре пород:

$$T|_{R=R_1} = T_e \quad (24)$$

На боковых границах при $x=0$ и $x=L$ принимается, что потоки тепла отсутствуют, т.е. получаем граничные условия II рода:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x=0, \quad R_1 \leq R \leq R_2, \\ x=L, \quad R_1 \leq R \leq R_2. \quad (25)$$

Для решения двумерной задачи теплообмена применим метод суммарной аппроксимации [8,9], который сводит исходную задачу к последовательности одномерных задач. На каждом временном слое решается последовательность одномерных задач. Для решения одномерной задачи промерзания–протаивания пород в постановке вида (17) используем численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов [10].

Результаты и обсуждение

Для проверки работоспособности разработанной математической модели теплообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных горных выработках рудников и шахт криолитозоны с учетом испарения и конденсации влаги проведены тестовые расчеты при следующих основных исходных данных: длина выработки 1500 м, площадь поперечного сечения выработки 20 м², расход воздуха 30 м³/с.

Для сравнения на рис. 1 приведены результаты расчетов температуры вентиляционного воздуха в конце вентиляционной выработки длиной 1500 м с учетом происходящих в ней массообменных процессов и без их учета. Как видно из графиков, зимой разница температур воздуха для обоих вариантов незначительная



Рис. 1. Динамика температур воздуха на начальном и конечном участках воздухоподающей выработки длиной 1500 м

(0,8°C), а летом этот параметр достигает 8,3°C. Это объясняется тем, что влагосодержание теплого воздуха значительно выше, чем холодного, т.е. неучет массообменных процессов приводит к значительным погрешностям в расчетах для рассмотренного примера.

Выработку длиной 1500 м условно разделим на три участка по 500 м и рассмотрим два варианта расчетов: 1) водопритоки отсутствуют и 2) водопритоки наблюдаются на втором участке (на расстоянии от устья с 500 м до 1000 м).

Для сравнения на рис. 2 приведены динамики изменений относительной влажности воздуха на конце выработки при наличии водопритоків и без них. Как видно из графиков, зимой происходит снижение относительной влажности воздуха, поскольку температура воздуха постепенно повышается по мере движения по выработке, а летом процесс противоположный (относительная влажность воздуха повышается). Наличие водопритоків способствует интенсификации испарительных процессов и повышению относительной влажности воздуха.

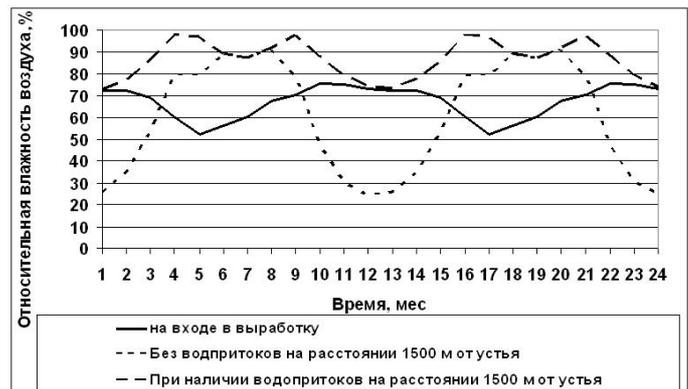


Рис. 2. Динамика относительной влажности воздуха на начальном и конечном участках выработки длиной 1500 м

На рис. 3 приведены распределения относительной влажности воздуха по длине выработки зимой и летом для двух вариантов (наличие и отсутствие водопритоків). Отчетливо видно, что зимой резко повышается влажность начиная с расстояния 500 м от устья (начало участка с водопритоків) до 1000 м (конец участка с водопритоків), а далее начиная с 1000 м (начало третьего участка, где отсутствуют водопритоки) постепенно снижается, поскольку происходит повышение температуры по длине выработки. Летом разница значений незначительная, так как происходит постепенное снижение температуры воздуха по длине выработки и преобладают конденсационные процессы.

Заклучение

Таким образом разработана математическая модель тепломассобмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных горных выработках рудников и шахт криолитозоны с учетом испарения и конденсации влаги. На её основе составлена компьютерная программа для расчета количественных показателей процессов тепломассобмена в горных выработках. Численная реализация разработанной модели позволяет рассчитать динамику изменений температуры вентиляционного воздуха и его относительной влажности в зависимости от термовлажностных условий выработки, что важно для прогноза теплового режима шахты и обеспечения безопасности ведения горных работ.

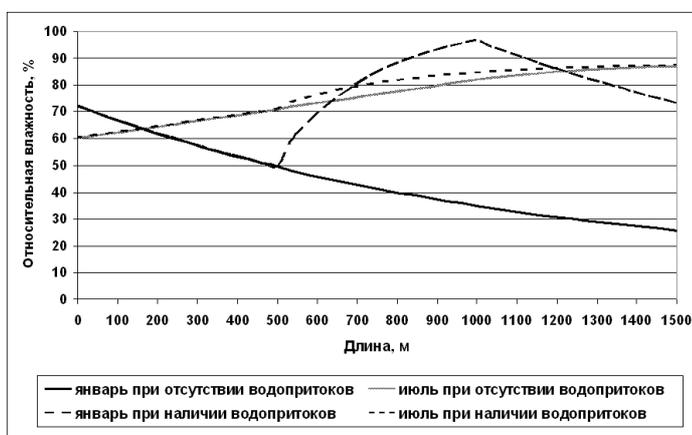


Рис. 3. Распределения относительной влажности воздуха по длине выработки зимой и летом

Литература

1. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. I. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.

УДК 550.822.7

Пути совершенствования строительства скважин в многолетнемерзлых породах

Р.А. Атласов, Р.М. Скрябин, Э.Р. Туги, М.В. Николаева, А.Г. Иванов, С.С. Бердыев

Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

АТЛАСОВ Ринат Александрович – ст. преподаватель, atlasov.rinat@mail.ru; СКРЯБИН Рево Миронович – к.т.н., проф., зав. каф., yakutsk_09@mail.ru; ТУГИ ЭвальдТ Раймондович – доцент, ndsvfu@mail.ru; НИКОЛАЕВА Мария Валентиновна – зав. лаб., mnikolaeva1990@gmail.com; ИВАНОВ Александр Геннадиевич – зав. лаб., iag-sakha@mail.ru; БЕРДЫЕВ Саид Сангинмуродович – ст. преподаватель, sidbersan@gmail.ru.

2. Криворучко А.М. Влияние породного массива на изменение влажности воздуха в выработках глубоких шахт // Материалы семинара по горной теплотехнике. Вып. 5. – Киев: Изд-во Института техн. информ., 1964. – С. 101–103.

3. Андреев Г.Г., Попков Г.К. Исследование массообменных процессов, происходящих в горном массиве и на поверхности выработок под воздействием рудничного воздуха // Эффективная и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых: Труды УЗПИ, вып. 3. – М.: Недра, 1971. – С. 171–176.

4. Ларионов Н.Н. Теплотехника. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.

5. Изаксон В.Ю., Слепцов В.И., Бандонадхай С. Математическое моделирование тепломассобмена в горных выработках Арктики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 120 с.

6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

7. Охлопков Н.М., Васильев В.И., Попов Ф.С. и др. Численные методы решения задач теплообмена подземных и наземных сооружений с мерзлым грунтом // Методы механики сплошной среды. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1977. – С. 5–18.

8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

9. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

10. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислит. мат. и мат. физики. – 1965. – Т. 5, №5. – С. 816–827.

Поступила в редакцию 15.12.2014

Заклучение

Таким образом разработана математическая модель тепломассобмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных горных выработках рудников и шахт криолитозоны с учетом испарения и конденсации влаги. На её основе составлена компьютерная программа для расчета количественных показателей процессов тепломассобмена в горных выработках. Численная реализация разработанной модели позволяет рассчитать динамику изменений температуры вентиляционного воздуха и его относительной влажности в зависимости от термовлажностных условий выработки, что важно для прогноза теплового режима шахты и обеспечения безопасности ведения горных работ.

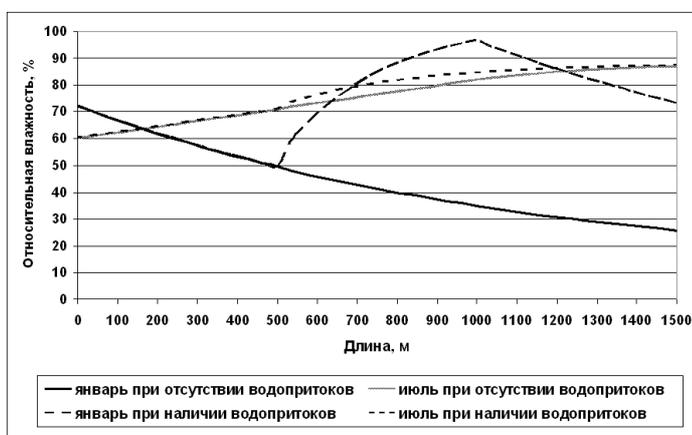


Рис. 3. Распределения относительной влажности воздуха по длине выработки зимой и летом

Литература

1. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. I. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.

УДК 550.822.7

Пути совершенствования строительства скважин в многолетнемерзлых породах

Р.А. Атласов, Р.М. Скрябин, Э.Р. Туги, М.В. Николаева, А.Г. Иванов, С.С. Бердыев

Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

АТЛАСОВ Ринат Александрович – ст. преподаватель, atlasov.rinat@mail.ru; СКРЯБИН Рево Миронович – к.т.н., проф., зав. каф., yakutsk_09@mail.ru; ТУГИ ЭвальдТРаймондович – доцент, ndsvfu@mail.ru; НИКОЛАЕВА Мария Валентиновна – зав. лаб., mnikolaeva1990@gmail.com; ИВАНОВ Александр Геннадиевич – зав. лаб., iag-sakha@mail.ru; БЕРДЫЕВ Саид Сангинмуродович – ст. преподаватель, sidbersan@gmail.ru.

2. Криворучко А.М. Влияние породного массива на изменение влажности воздуха в выработках глубоких шахт // Материалы семинара по горной теплотехнике. Вып. 5. – Киев: Изд-во Института техн. информ., 1964. – С. 101–103.

3. Андреев Г.Г., Попков Г.К. Исследование массообменных процессов, происходящих в горном массиве и на поверхности выработок под воздействием рудничного воздуха // Эффективная и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых: Труды УЗПИ, вып. 3. – М.: Недра, 1971. – С. 171–176.

4. Ларионов Н.Н. Теплотехника. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.

5. Изаксон В.Ю., Слепцов В.И., Бандонадхай С. Математическое моделирование тепломассобмена в горных выработках Арктики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 120 с.

6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

7. Охлопков Н.М., Васильев В.И., Попов Ф.С. и др. Численные методы решения задач теплообмена подземных и наземных сооружений с мерзлым грунтом // Методы механики сплошной среды. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1977. – С. 5–18.

8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

9. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

10. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислит. мат. и мат. физики. – 1965. – Т. 5, №5. – С. 816–827.

Поступила в редакцию 15.12.2014

В процессе бурения скважин в толще многолетнемерзлых пород встречается ряд специфических осложнений, которые нередко приводят к серьезным авариям: выпучивание грунта, разрушение устья скважин, обвалы стенок скважин, обрыв и смятие обсадных колонн из-за неэффективного цементирования в зоне мерзлых пород, выброс газа на поверхность, грифоны и т.д. Упомянутые выше осложнения предопределяются некачественным бурением и креплением скважин. Даны основные рекомендации, способствующие успешной проводке скважин в многолетнемерзлых породах: строительство скважин без спуска шахтовых и удлиненных направлений; бурение на низкотемпературных промывочных жидкостях; бурение в летний период долотами меньшего размера с последующем расширением до необходимого диаметра; достижение максимально возможных коммерческих скоростей проводки скважин.

Ключевые слова: режим бурения, буровой раствор, многолетнемерзлые породы, растепление стенок скважины, температурный режим, калибратор, расширение ствола скважины.

In the process of drilling in permafrost there are a number of specific complications that often lead to serious problems: soil buckling, destruction of wellheads, collapses of the walls of wells, break and collapse of casing strings because of inefficient cementation in permafrost zone, release of gas on to the surface, griffins, etc. The above mentioned complications are predetermined by low-quality drilling and well casing. The article gives basic recommendations for successful wells drilling in permafrost conditions which are: construction of wells without descent shaft and elongated directions; drilling at low temperature drilling fluids; drilling in summer by smaller bits with subsequent expansion to the desired diameter; achieving the maximum possible business speed of well conducting.

Key words: drilling mode, boring solution, permafrost, thawing the borehole walls, temperature control, calibrator, extension of the wellbore.

Введение

В процессе бурения скважин в толще многолетнемерзлых пород встречается ряд специфических осложнений, которые нередко приводят к серьезным авариям: выпучивание грунта, разрушение устья скважин, обвалы стенок скважин, обрыв и смятие обсадных колонн из-за неэффективного цементирования в зоне мерзлых пород, выброс газа на поверхность, грифоны и т.д. Главными факторами, определяющими степень влияния многолетней мерзлоты на проводку скважин, являются физико-химические, механические свойства мерзлых пород, температура промывочной жидкости. Мерзлые породы по своим физико-механическим свойствам резко отличаются от пород того же минералогического состава, не подвергшихся замораживанию. Можно выделить два основных типа многолетнемерзлых пород: породы, которые сформировались и уплотнились при положительной температуре, а позже замерзли, и породы, сформировавшиеся при отрицательной температуре, связанные друг с другом только посредством льда[1].

Во время бурения скважин, лед, заполняющий поры, при оттаивании мерзлых пород переходит в жидкую фазу, занимающую меньший объем, а образовавшуюся пустоту заполняет промывочная жидкость положительной температуры – происходит дальнейшее оттаивание пород. Силы сцепления между частицами рыхлых пород резко уменьшаются, что ве-

дет к осыпанию или обвалам стенок скважины.

Нарушение теплового режима многолетнемерзлых грунтов при строительстве скважин приводит к возникновению аварийных ситуаций с серьезными экономическими, материально-техническими, экологическими и социальными последствиями. Тепловое взаимодействие в процессе бурения и крепления в интервалах с многолетнемерзлыми грунтами оказывает значительное влияние на состояние грунта, что негативно сказывается на качестве работ.

Технология бурения мерзлых толщ, представленных твердыми и крепкими породами низкой проницаемости, практически идентична бурению в таких же породах с положительной температурой. В то время, как строительство скважин в зоне мерзлоты, представленной преимущественно льдистыми, слабосцементированными, рыхлыми породами, резко отличается от строительства скважин в аналогичных породах с положительной температурой.

В этом случае основную роль в нормальной проводке ствола скважины играют температурный режим промывки скважины и продолжительность бурения толщи многолетнемерзлых пород, т.е. факторы, оказывающие решающее влияние на растепление стенок скважины.

Если при бурении многолетнемерзлых пород применяется промывочная жидкость с положительной температурой, то породы в пристволевой зоне постепенно нагреваются и оттаивают.

Радиус зоны растепления тем больше, чем выше температура промывочной жидкости и продолжительнее ее воздействие. Нередко радиус зоны растепления достигает нескольких метров.

При растеплении пород второго типа в скважине возникают специфические осложнения: по мере того как тает лед, освобождающиеся минеральные частицы (песок, галька) осыпаются в ствол скважины и потоком промывочной жидкости выносятся на дневную поверхность; при этом в скважине образуется полость большого диаметра. При растеплении нередки случаи обваливания пород, что служит причиной прихвата бурильных труб. Наблюдаются случаи проседания пород вокруг устья скважины на глубину нескольких метров, и в результате возникает опасность аварий с буровым оборудованием. Проседание пород после завершения буровых работ может явиться причиной повреждения обсадных колонн и эксплуатационного оборудования, взрывов и пожаров[2].

При длительном простое скважины отрицательные температуры в приствольной зоне восстанавливаются. При замерзании воды в этой зоне возможно повреждение обсадной колонны, если последняя спущена в скважину (смятие или обрыв).

Основным способом предотвращения названных осложнений в мерзлых породах второго типа является сохранение отрицательной температуры стенок скважины. Это может быть достигнуто охлаждением промывочной жидкости до температуры $-2...-5$ °С. Можно свести к минимуму растепление пород, если бурить с продувкой воздухом или с промывкой охлажденной азрированной жидкостью. Полезной практикой при бурении в мерзлых породах второго типа является использование долота уменьшенного диаметра: к тому времени, как скважина будет пробурена до глубины, на которую нужно спустить обсадную колонну, диаметр скважины вследствие растепления увеличится до нужного для этого размера. После разбуривания толщ мерзлых пород второго типа ствол скважины необходимо укрепить обсадной колонной и тем самым исключить возможность дальнейшего осыпания пород. Башмак этой колонны следует устанавливать в прочных породах, не осыпающихся при растеплении. Кольцевое пространство между колонной и стенками скважины, если они сложены непроницаемыми породами при положительной температуре, полезно герметизировать пакером, особенно в газовых и газоконденсатных скважинах. Это позволит предотвратить прорыв газа в заколонное пространство и образование грифонов вокруг устья.

Выбор глубины спуска кондуктора

Получение цементного камня с необходимыми механическими свойствами, с высокой стойкостью и низкой проницаемостью за колонной напротив многолетнемерзлых пород еще не может полностью гарантировать надежной герметизации затрубья. Слабым местом остается контакт между цементным камнем и мерзлой породой. Многолетняя мерзлота в основном представлена породами с прослойками и прожилками льда. В процессе дальнейшего углубления скважины повышается температура промывочной жидкости.

В результате циркуляции жидкости с повышенной температурой мерзлые породы за кондуктором растепляются, по контакту цемента с породой и в самой породе могут образовываться каналы для движения газа к устью скважины. Поэтому в целях надежной изоляции затрубного пространства башмак колонны рекомендуется устанавливать не менее, чем на 100–150 м ниже подошвы мерзлоты, обеспечивая тем самым надежный контакт цемента с породой.

Минимальная глубина спуска кондуктора

$$H = \frac{\rho_{nl}}{\alpha} = \frac{150}{0,2} = 750 \text{ м.}$$

Бурение промывочными жидкостями с отрицательной температурой

Анализ кавернообразования в зависимости от температуры циркулирующего раствора, проведенный по Средневилульской площади, показывает, что скважины, пробуренные в зимних условиях промывочными жидкостями с температурой, близкой к нулю, имеют коэффициент кавернозности около 1,2, т.е. вполне удовлетворительный.

Следовательно, при бурении в зимнее время необходимо использовать низкие температуры окружающей среды и бурить промывочными жидкостями с температурой 2 до $-1,5$ °С. Такая температура вполне достаточна для предохранения от растепления и разрушения стенок скважины. Получение жидкостей, не замерзающих при температуре 2 до $-1,5$ °С, осуществляется добавкой 3–5 % хлористого натрия или хлористого кальция.

Аналогичные скважины, пробуренные в летнее время при высоких положительных температурах промывочной жидкости, имеют коэффициент кавернозности 1,7–2.

Самопроизвольное искривление скважин

При бурении нужно стремиться к тому, чтобы фактическая траектория ствола строго соответствовала проектной. Самопроизвольное откло-

нение фактической траектории от проектной, обычно именуемое искривлением (точнее, неуправляемым искривлением), может иметь ряд отрицательных последствий: нарушается сетка разработки месторождения; увеличиваются длина ствола скважины, расходы на ее сооружение, силы трения между трубами и стенками скважины; осложняется выполнение спуско-подъемных операций; возрастают затраты мощности на бурение; интенсифицируется износ бурильных, обсадных и насосно-компрессорных труб; усиливается желобообразование в местах перегиба ствола скважины; нередко возрастает аварийность с трубами; ухудшается качество цементирования скважин.

Можно назвать несколько причин, способствующих самопроизвольному искривлению скважин.

Причины геологического характера: анизотропия пород; частое чередование пород с разными механическими свойствами, особенно при их наклонном залегании; наличие в породах трещин и других полостей и т. п. Долото, работающее на забое, сложенном такими неоднородными по составу, текстуре и другим свойствам породами, встречает в разных точках существенно разные сопротивления. Результирующая реакция забоя оказывается смещенной относительно его центра, поэтому на нижний участок бурильной колонны действует изгибающий момент, под влиянием которого долото поворачивается на некоторый угол к первоначальному направлению оси колонны [3].

Причины технического порядка: наличие в нижней части бурильной колонны изогнутых труб или перекошенных резьбовых соединений при бурении с помощью забойных двигателей; несоосность талевого системы и стола ротора, несоосность стола ротора и направления скважины (последние сказываются в основном при бурении верхнего интервала скважины).

Причины технологического порядка: чрезмерно высокие осевые нагрузки на долото, вызывающие продольный изгиб нижнего участка бурильной колонны.

Предотвратить самопроизвольное искривление скважины или хотя бы свести его к минимуму можно надлежащим выбором компоновки нижнего участка бурильной колонны при заданной осевой нагрузке на долото, при необходимости – уменьшением нагрузки до допустимого минимума; систематическим контролем направления скважины, особенно при бурении часто чередующихся по свойствам пород; включением из компоновки нижнего участка бурильной колонны изогнутых, с перекошенными резьбовыми соединениями труб и тщательной

центровкой талевого системы относительно стола ротора, проверкой горизонтальности последнего.

Бурение долотами меньшего диаметра с последующим расширением

Бурение скважин № 8, 3, 10 Мастахской площади в зоне мерзлоты производилось долотом № 12 с последующим расширением долотом № 16. Средние диаметры скважин после расширения по кавернограммам соответственно равны: 400 мм, 405 мм, 410 мм. На скважинах № 9, 2 Мастахской площади бурение многолетнемерзлых пород в идентичных условиях проводилось долотом № 16. Средние диаметры кавернограмм соответственно равны 620 мм и 600 мм. Коммерческие скорости бурения скважин составляли: № 1 – 4140 м/ст.мес., № 3 – 2770 м/ст.мес., № 8 – 2850 м/ст.мес., № 9 – 5610 м/ст.мес., № 10 – 2780 м/ст.мес.

По данным бурения этих скважин можно сделать заключение, что бурение с последующим расширением ствола скважины устраняет кавернообразование, но приводит к снижению скорости бурения. Следовательно, данный способ бурения следует применять в летний период, когда промывочные растворы имеют высокую положительную температуру и осложнения, вызываемые растеплением ствола скважины, требуют более значительных затрат времени на их ликвидацию, чем потери времени на расширение скважины. Значительное сокращение времени на расширение скважин можно получить, применяя планетарные долота или специальные расширители, например дисковые. Также хорошо себя зарекомендовали шаблон-калибраторы ПМ 147344 (рисунок), которые, не обладая режущо-скалывающими свойствами стандартного лопастного или шарошечного калибратора, разминают, раздавливают и истирают своим корпусом неровности и уступы на стенках скважины, что значительно снижает кавернообразование.



Шаблон-калибратор: а – схема устройства; б – изготовленное по чертежам устройство (скв.321-63, Чаяндинское НГКМ)

Достижение максимально возможных коммерческих скоростей проводки скважин

При бурении в толще многолетнемерзлых пород промывочными жидкостями с положительной температурой необходимо добиваться максимального сокращения времени. Чем длительнее сохраняется контакт жидкостей с положительной температурой с мерзлыми породами, тем более интенсивным теплоэрозионным разрушениям подвергаются стенки ствола скважины, тем более серьезные осложнения могут возникнуть в ее стволе.

Наиболее приемлемой является коммерческая скорость в пределах 6–7 тыс. м/ст.мес.

Для достижения этих скоростей необходима тщательная подготовка к забуриванию скважин, а именно: заблаговременное бурение под шурф для квадратной штанги, подготовка и укладка на мостки всех труб, предназначенных к спуску кондуктора, осуществление забора воды для приготовления промывочных растворов в летнее время из наиболее глубоких мест, где вода имеет более низкую температуру, раствор готовить перед самым забуриванием, максимально сократив время для его приготовления с целью сохранения в растворе низкой температуры. Электроизмерительные работы перед спуском кондукторов необходимо проводить, как правило, выборочно на отдельных скважинах, бурящихся в зимний период, для рекогносцировки. Бурение проводить в форсированном режиме, применяя наиболее оптимальные типы долот. Как уже указывалось выше, в летнее время бурить долотами меньшего диаметра с последующим расширением [4].

Заключение

Основные рекомендации, описанные в этой статье, способствующие успешной проводке скважин в многолетнемерзлых породах на современном этапе развития техники и технологии бурения:

1. Строительство скважин без спуска шахтовых и удлиненных направлений.
2. Бурение на низкотемпературных промывочных жидкостях.
3. Бурение в летний период долотами меньшего размера с последующем расширением до необходимого диаметра.
4. Достижение максимально возможных коммерческих скоростей проводки скважин.

Литература

1. *Руководство* по креплению разведочных скважин в условиях многолетнемерзлых пород в районах Якутской АССР. – 1972.
2. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов. – М.: Недра, 2003. – 211с.
3. Гусман М.Т. Анализ и перспективы улучшения работы колонковых долот: Труды Всесоюз. совещания нефтяников «Буровые долота». – М.: Гостоптехиздат, 1952. – С.51–72.
4. Коробейников Н.Ю., Тергулова Г.Р. Особенности экономической оценки проведения геолого-технических мероприятий. – М.: Нефтяное хозяйство. – 2001. – №4. – С. 13.

Поступила в редакцию 29.04.2015 г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Металлургия и материаловедение

УДК 699.14 (571.56)

Перспективы развития металлургии в Якутии в связи с созданием новых поколений сталей северного исполнения

Б.С. Ермаков*, О.И. Слепцов**, П.П. Петров**

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург
** Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Дается оценка эффективности использования местного минерального сырья для создания хладостойких, высокопрочных и износостойких сплавов в северном исполнении. Рассмотрены некоторые направления разработки и создания сталей северного исполнения, в том числе работающих в условиях большого износа. Проанализирована целесообразность применения железомарганцевых руд Ленского рудного поля при изготовлении литых изделий с целью восстановления узлов и деталей техники эксплуатируемой горнодобывающей отрасли Республики Саха (Якутия). Приведены химические составы созданных хладостойких, высокопрочных и износостойких сталей нового поколения с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: металлургия, хладноломкость стали, плавка руды, переработка минерального сырья, Ленское рудное поле, редкие и редкоземельные металлы.

The article assesses the efficiency of the use of local mineral resources for the creation of cold-resistant, high-strength and wear-resistant alloys for the north execution. Certain directions of the development and creation of the steels of north execution including those working in conditions of heavy wear are considered. The expediency of use of iron-manganese ores of the Lena ore field in production of cast products for restoring parts and components of mining machinery operated in the Republic of Sakha (Yakutia). The chemical compositions of created cold-resistant, high-strength and wear-resistant steels of new generation with a given set of operating properties are presented.

Key words: metallurgy, cold brittleness of steel, ore melting, mineral raw materials processing, Lena ore field, rare and rare earth metals.

Российская Федерация, как государство, располагается, в основном, в двух климатических зонах – умеренно-холодной, где температура в зимние месяцы редко опускается ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и холодной, где температура может достигать $-60\text{...}-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. В холодной климатической зоне – Восточной Сибири, Таймыре, Якутии, Сахалине и т. д. располагаются основные запасы полезных ископаемых страны, развиваются добывающие и перерабатывающие производства, базируются крупные войсковые соединения.

Анализ развития добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности в последние двадцать–тридцать лет показывает, что отчетливо наметился перенос центра тяжести добычи и переработки полезных ископаемых, в том числе нефти, газа, металлов, в заполярную тундру, шельфовую зону Северного Ледовитого океана и Северного Сахалина. Одной из острых проблем, вставших при освоении северных территорий, является хладноломкость материалов – явление их хрупкого разрушения при низких температурах.

Впервые явление хладноломкости стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX века, когда было отмечено, что рельсы, изготовленные из литого металла, внезапно разруша-

*ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – д.т.н., проф., ermakov55@bk.ru; **СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич – д.т.н., проф., зав. отделом, o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru; **ПЕТРОВ Петр Петрович – в.н.с., ppp32@mail.ru.

лись при понижении температуры. Уже тогда была признана актуальной проблема хладноломкости металлов и необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

Еще в XVIII веке (1733–1743 гг. обеспечение необходимым снаряжением Второй Камчатской экспедиции Витуса Беринга) кованые изделия (якоря, гвозди, скобы, полозья и т. п.), изготовленные мастерами рудных дел и кузнецами Тамгинского железного завода из буотамской железной руды, отличались повышенной прочностью и износостойкостью, чем аналогичные изделия, привезенные из европейской части Российского государства. А впоследствии, как выяснилось, причиной этого явился особый минеральный и химический состав марганцовистых бурых железняков Ленского рудного поля Центральной Якутии. Тамгинский железный завод (1735–1756 гг.) на заре индустриальной эпохи был первым промышленным предприятием Российского государства, продукция которого предназначалась исключительно для восточной части страны. Железные изделия распространялись на огромной территории от западных границ Якутии до самых восточных окраин России, что явилось переломным моментом промышленного освоения необжитых территорий [1].

В связи с реализацией проектов по добыче и переработке минерального сырья, а также с завершением строительства и последующей эксплуатации железной дороги Беркамит–Якутск особую остроту приобретают вопросы применения высокопрочных хладостойких сталей различного назначения, изготавливаемых на базе железомарганцевых руд или с использованием марганцовистых концентратов. На территории республики разведаны месторождения железных (Десовское, Таежное, Горкитское, Тарынахское), железомарганцевых (Буотамское), железотитановых руд, редких и редкоземельных металлов (Томторское). Это позволяет рассчитывать на создание на территории республики собственной металлургической базы, опирающейся на собственное сырье и, практически, не зависимой от внешних поставок.

Институтом физико-технических проблем Севера СО РАН совместно с ведущими институтами Российской Федерации (гг. Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Томск, Красноярск и др.) в течение последних (с 2005 по 2014 г.) лет ведутся научно-исследовательские работы по изучению технологических качеств железомарганцевых руд, расположенных на территории Ленского рудного поля (Центральная Якутия) [2,3].

Железорудные месторождения Якутии с учетом геохимической специализации региона, имеющего повышенный фон редких и редкозе-

мельных элементов, являются перспективным материалом для разработки специальных сталей. Особый интерес представляют осадочные месторождения железа (рис.1), имеющие уникальный состав руды и шлакообразующих минералов. Для экспериментальных исследований процессов прямого восстановления (рис.2 и 3) и экспериментальной апробации получения новых хладостойких, износостойких и высокопрочных конструкционных сплавов на базе системы Fe–Mn вполне пригодны железомарганцовистые, а также природно-легированные руды Ленского рудного поля, в частности из рудопроявлений «Лютенге» и «Куртанг».



Рис.1. Рудное тело на рудопроявлении «Куртанг» Ленского рудного поля

При финансовой поддержке и согласно ряду постановлений Президиума СО РАН (с 2007 по 2013 г.) по итогам конкурса поддержки экспедиционных работ сотрудниками ИФТПС СО РАН были организованы и успешно проведены экспедиционные работы на месторождениях железомарганцовистых руд Центральной и Южной Якутии.



Рис.2. Выплавленная крица из руды Ленского рудного поля



Рис.3. Выплавленный ферросплав из руды Ленского рудного поля

В настоящее время одним из главнейших направлений развития металловедения и металлургии становится создание новых прочных материалов с высокими хладостойкостью, огнестойкостью, пластичностью, устойчивостью к переменным нагрузкам и перегрузкам.

Наиболее простым и эффективным методом повышения прочности стали является увеличение содержания в ней углерода. Однако этот механизм упрочнения не пригоден для сталей низкотемпературной техники, содержание углерода – основного упрочняющего железа элемента в этих сталях должно быть сведено к минимуму (0,08–0,17 %), так как увеличение концентрации углерода в стали на 0,01 % повышает температуру, при которой происходит охрупчивание стали на 10–15 %. Для замещения упрочняющего воздействия углерода и повышения хладостойкости стали необходимо применять метод микролегирования, который позволяет регулировать свойства железоуглеродистых сплавов (сталей). В состав легирующих элементов входят редкие и редкоземельные металлы и их соединения [4].

В последние годы приобретает актуальность создание новых материалов с заранее заданными физико-механическими свойствами с использованием минерального сырья (рис.4) с



Рис.4. Обогащенная и измельченная железомарганцевая руда, как готовая шихта для последующей плавки

природным комплексом легирующих элементов, обеспечивающих эти свойства. Для создания новых высокопрочных хладостойких сталей, отвечающих климатическим зонам, необходимо провести опытно-экспериментальные исследования [5,6]. Перспективным материалом для разработки специальных сталей являются месторождения марганцовистых бурых железняков в Якутии.

В Центральной Якутии марганцево-железные месторождения распространены на обширной территории Лено-Буотамского и Лено-Амгинского междуречья, образуя Ленское рудное поле. Наиболее изученным и хорошо разведанным является Буотамское месторождение марганцовистых бурых железняков [7].

Перспективным путем повышения прочности и хладостойкости сталей является регулирование размером зерен. Уменьшение действительных и наследственных зерен может быть достигнуто несколькими технологическими приемами – оптимизацией химического состава стали и технологии ее выплавки; микролегированием, например одним или несколькими элементами из группы V, Nb, Zr, Ti; модифицированием редкоземельными и щелочно-земельными металлами с целью глобуляризации нематаллических включений. С этой точки зрения особый интерес представляют собой природно-легированные железомарганцевые руды Ленского рудного поля Республики Саха (Якутия), в составе которых содержатся как микролегирующие, так и модифицирующие примеси [8].

Совместно с СПБГПУ созданы конструкционные стали нового поколения, обладающие высокими прочностными свойствами в условиях низких климатических температур.

Сталь создана на базе железомарганцевой руды Ленского рудного района. Химический состав (мас. %): углерод 0,12–0,18; марганец 0,3–0,6; кремний 0,15–0,37; ванадий 0,08–0,12; ниобий + титан 0,1–0,15; фосфор 0,005–0,020; сера 0,001–0,020; алюминий 0,03–0,06; РЗМ (церий, лантан, неодим, иттрий – в соотношении 35:35:15:15) 0,01–0,09; кальций 0,001–0,01; барий 0,001–0,01; азот 0,03–0,06; железо – остальное. Сталь обладает высоким уровнем хладостойкости, механических свойств и трещиностойкости, пониженным уровнем сегрегаций атомов примесных элементов в границах зерен за счет оптимизации микролегирующего комплекса и термической обработки, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность и долговечность оборудования, температура эксплуатации которого может опускаться до –60 °С.

Разработаны и прошли широкие натурные испытания в условиях Республики Саха (Якутия):

- хладостойкая, маломагнитная сталь для узлов и деталей бурового оборудования. Химический состав (мас. %): углерод 1,0–1,2; марганец 24,0–26,0; хром 2,5–5,0; алюминий 4,0–6,0; бор 0,005–0,1; иттрий 0,005–0,05; церий 0,005–0,05; ванадий 0,08–0,12; ниобий 0,01–0,04; кальций 0,001–0,01; железо – остальное. Сталь имеет высокие механические свойства и низкую магнитную проницаемость, величина которой не изменяется в диапазоне рабочих температур бурового оборудования;

- хладостойкая малоперлитная экономлегированная сталь для сварных литых деталей рам большегрузных промышленных тракторов и т.п. Химический состав (мас. %): углерод 0,10–0,16; марганец 0,9–1,3; кремний 0,2–0,6; хром 0,2–0,6; ванадий 0,10–0,15; содержание серы и фосфора не более 0,020 % каждого. Рекомендуемое содержание остаточного алюминия составляет 0,3–0,06 %, а кальция при обработке ШЗМ 0,025–0,035 %. Температура нагрева под нормализацию 900–950 °С. Критический коэффициент интенсивности напряжений стали при динамическом нагружении в 1,4 раза выше такового серийной стали. Удельная работа развития трещины при – 60 °С составляет 14 Дж/см², а критическая температура хрупкости T_{50} равна –22 °С. Сталь имеет высокие литейно-технологические свойства, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием, не склонна к образованию горячих и холодных трещин при сварке, а механические свойства и хладостойкость сварных соединений удовлетворяют указанным требованиям;

- хладостойкая сталь с повышенной прочностью. Химический состав (мас. %): углерод 0,15–0,22; марганец 0,3–0,6; кремний 0,15–0,40; ванадий 0,08–0,12; титан 0,001–0,040; ниобий 0,001–0,040; алюминий 0,03–0,06; сера 0,010–0,020; фосфор 0,010–0,020; церий 0,005–0,05; кальций 0,001–0,01; барий 0,001–0,01, железо – остальное;

- высокопрочная среднелегированная сталь для ответственных деталей техники в северном исполнении, в том числе опорные катки и зубья ковшей мощных карьерных экскаваторов. Химический состав (мас. %): углерод 0,38–0,45; кремний 0,40–0,50; марганец 0,80–1,20; хром 2,0–2,50; молибден 0,20–0,30; никель 1,30–1,60; медь не более 0,30; ванадий 0,10–0,15; кальций 0,005–0,01; церий 0,005–0,01; алюминий 0,03–0,06; железо – остальное. Сталь обладает повышенной износостойкостью при работе экскаваторов в различных горных породах.

Предложенные стали обладают хорошей технологичностью, не требуют усложнения производственного процесса и рекомендованы для

изготовления ответственных деталей горнодобывающей техники.

Созданные стали (рис.5) по физико-механическим свойствам превосходят своих прототипов (серийных аналогов) на 15–25 %.



Рис.5. Образцы выплавленных хладостойких и высокопрочных сталей

Заключение

1. В связи с планируемым развитием Арктического шельфа Северного Ледовитого океана на территории Республики Саха (Якутия), включающим проведение широкомасштабных геологоразведочных работ и разработку минерально-сырьевых ресурсов, необходимо усилить обеспечение работ в области материаловедения, металлургии и работоспособности механизмов и конструкций в условиях естественных низких температур. В Институте физико-технических проблем Севера СО РАН имеются все условия для развития данного направления, в частности, накопленный за 45 лет интеллектуальный багаж и высококвалифицированный кадровый состав. Важным фактором развития данного направления является территориальная близость интересующей территории и возможность комплексирования научных исследований с другими подразделениями ЯНЦ СО РАН, которые так или иначе будут задействованы в данном проекте – Институт горного дела Севера и Институт мерзлотоведения.

2. В области разработки новых металлических материалов и технологических процессов их производства сплавы системы Fe–Mn занимают особое место. Легированные сплавы, созданные на основе системы Fe–C–Mn, имеют высокую прочность при низких температурах, повышенную коррозионную стойкость, а также удовлетворительные динамические характеристики.

3. Предложенные новые поколения среднелегированных сталей, обладающих хорошей тех-

нологичностью, рекомендованы для изготовления высокопрочных ответственных литых деталей. Разработки технологии восстановления руд Ленского рудного поля для выплавки хладостойких сталей, в частности, предложенные химические составы, будет способствовать значительному сокращению себестоимости металлопродукции и повышению работоспособности горнодобывающей техники.

Литература

1. Подъячев Б.П., Бикбаева Т.В., Амузинский В.А. Как мы искали Тамгинский железный завод // Наука и техника в Якутии. – 2003. – №1. – С. 54–59.
2. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Исследование физико-механических основ создания высокопрочных и хладостойких сплавов северного исполнения с применением местной комплексно-легирующей РЗМ железомарганцевой руды // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – №9. – С. 51–58.
3. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Разработка высокопрочных и хладостойких сплавов с применением руд Ленского рудного поля // Сб. докладов II Межд. науч. конф. «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (24–25 ноября 2011 г., Орск). – М.: Машиностроение, 2012. – Т. 1. – С. 444–453.
4. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Москвитин С.Г. и др. Перспективы создания высокопрочных, хладостойких сталей из природно-легирующей руды Ленского рудного поля // Химическая технология. – 2010. – Т. 11, №12. – С. 755–760.
5. Ермаков Б.С., Солнцев Ю.П. Низкотемпературные свойства легированных сплавов системы Fe–Mn // Прочность материалов и конструкций при низких температурах: – СПб.: СПбГУНИПТ, 2003. – С. 31–36.
6. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Поваров Д.В. Материалы и надежность низкотемпературных конструкций. – СПб.: Химиздат, 2007. – 168 с.
7. Слепцов О.И., Лебедев М.П., Петров П.П., Москвитин С.Г. Разработка сталей северного исполнения на основе железомарганцевой руды Ленского рудного поля // Материалы выездной сессии научного Совета РАН по научным основам химической технологии «Современные проблемы химической технологии» (20–22 октября 2009 г., Новосибирск). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – С. 48–49.
8. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Возможность применения руд Ленского рудного поля при разработке новых хладостойких сталей // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2011. – С. 40–48.

Поступила в редакцию 24.07.2015

УДК 621.777 : 539.538 : 620.186

Особенности триборазрушения гетерогенных структур системы «субмикронная ферритная матрица, армированная нано- и микрокарбидами»

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

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

Проведены экспериментальные исследования износостойкости и трибодеструкции при трении скольжения низколегированной стали до и после объемного наноструктурирования с применением холодного (при комнатной температуре) равноканального углового прессования. На различных этапах трибонагружения изучен с применением методов оптической и растровой электронной микроскопии, профилометрии и расчета автокорреляционных функций шероховатости поверхностей трения процесс изнашивания стали в крупнозернистом и наноструктурированном состояниях. Показано, что образование в ней гетерогенной структуры системы «субмикронная ферритная матрица – наноразмерная карбидная фаза» обеспечило кратное увеличение износостойкости. Выявлены особенности контактного разрушения, определяющие рост износостойкости стали при измельчении структуры и указывающие на существенные различия в природе формирования трибологической прочности металла в зависимости от уровня дисперсности структурных элементов.

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отделом, spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с., snmachar@yandex.ru.

нологичностью, рекомендованы для изготовления высокопрочных ответственных литых деталей. Разработки технологии восстановления руд Ленского рудного поля для выплавки хладостойких сталей, в частности, предложенные химические составы, будет способствовать значительно сокращению себестоимости металлопродукции и повышению работоспособности горнодобывающей техники.

Литература

1. Подъячев Б.П., Бикбаева Т.В., Амузинский В.А. Как мы искали Тамгинский железный завод // Наука и техника в Якутии. – 2003. – №1. – С. 54–59.
2. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Исследование физико-механических основ создания высокопрочных и хладостойких сплавов северного исполнения с применением местной комплексно-легированной РЗМ железомарганцевой руды // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – №9. – С. 51–58.
3. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Разработка высокопрочных и хладостойких сплавов с применением руд Ленского рудного поля // Сб. докладов II Межд. науч. конф. «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (24–25 ноября 2011 г., Орск). – М.: Машиностроение, 2012. – Т. 1. – С. 444–453.
4. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Москвитин С.Г. и др. Перспективы создания высокопрочных, хладостойких сталей из природно-легированной руды Ленского рудного поля // Химическая технология. – 2010. – Т. 11, №12. – С. 755–760.
5. Ермаков Б.С., Солнцев Ю.П. Низкотемпературные свойства легированных сплавов системы Fe–Mn // Прочность материалов и конструкций при низких температурах: – СПб.: СПбГУНИПТ, 2003. – С. 31–36.
6. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Поваров Д.В. Материалы и надежность низкотемпературных конструкций. – СПб.: Химиздат, 2007. – 168 с.
7. Слепцов О.И., Лебедев М.П., Петров П.П., Москвитин С.Г. Разработка сталей северного исполнения на основе железомарганцевой руды Ленского рудного поля // Материалы выездной сессии научного Совета РАН по научным основам химической технологии «Современные проблемы химической технологии» (20–22 октября 2009 г., Новосибирск). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – С. 48–49.
8. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Возможность применения руд Ленского рудного поля при разработке новых хладостойких сталей // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2011. – С. 40–48.

Поступила в редакцию 24.07.2015

УДК 621.777 : 539.538 : 620.186

Особенности триборазрушения гетерогенных структур системы «субмикронная ферритная матрица, армированная нано- и микрокарбидами»

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

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

Проведены экспериментальные исследования износостойкости и трибодеструкции при трении скольжения низколегированной стали до и после объемного наноструктурирования с применением холодного (при комнатной температуре) равноканального углового прессования. На различных этапах трибонагружения изучен с применением методов оптической и растровой электронной микроскопии, профилометрии и расчета автокорреляционных функций шероховатости поверхностей трения процесс изнашивания стали в крупнозернистом и наноструктурированном состояниях. Показано, что образование в ней гетерогенной структуры системы «субмикронная ферритная матрица – наноразмерная карбидная фаза» обеспечило кратное увеличение износостойкости. Выявлены особенности контактного разрушения, определяющие рост износостойкости стали при измельчении структуры и указывающие на существенные различия в природе формирования трибологической прочности металла в зависимости от уровня дисперсности структурных элементов.

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отделом, spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с., snmachar@yandex.ru.

Ключевые слова: феррит, карбид, наноструктурирование, износостойкость, фрикционная поверхность, шероховатость, трибодеструкция.

Experimental investigations of wear resistance and tribodestruction during sliding friction of low alloy steel before and after the bulk nanostructuring using cold (at room temperature) equal channel angular pressing were conducted. At various stages of loading by friction the wear of steel in coarse-grained and nanostructured states was studied using the methods of optical and scanning electron microscopy, roughness measurements of the friction surfaces and by calculation autocorrelation functions of roughness. It is shown that formation of heterogeneous structure of the system «submicron ferrite matrix – nanosized carbide phase» provided multiple increase of wear resistance. The peculiarities of the contact fracture, determining the growth of wear resistance of steel as a result of the structure refinement and indicating significant differences in the nature of formation of the metal tribological strength, depending on the dispersion level of the structural elements are revealed.

Key words: ferrite, carbide, nanostructuring, frictional loading, wear resistance, friction surface, roughness, tribodestruction.

Введение

В настоящее время резервы повышения механических и эксплуатационных характеристик сталей различных структурных классов на основе использования полиморфных превращений считаются практически исчерпанными. Поэтому интенсивное развитие получают методы, позволяющие резко изменять физико-механические свойства металлических материалов (в том числе сталей) за счет формирования в них нано- и субмикроструктурных состояний. Это, прежде всего, равноканальное угловое прессование (РКУП) при температурах, обычно составляющих около 0,3–0,4 от температуры плавления деформируемого металла [1, 2]. При РКУП заготовка продавливается через стальную матрицу, состоящую из двух каналов с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися под определенным углом. Как правило, применяются несколько циклов (проходов) прессования.

Для промышленного применения метода РКУП выгодно понижение температур деформации, но из-за относительно небольшого ресурса пластичности сталей заготовки быстро разрушаются уже после нескольких проходов. Нами была обоснована и экспериментально подтверждена возможность наноструктурирования ферритно-перлитной стали 09Г2С при комбинировании двух циклов «холодного» (при 20 °С) РКУП с последующим отжигом при 350 °С и 450 °С [3]. Такая обработка обусловила формирование структуры в виде субмикронной ферритной матрицы, упрочненной наноразмерными частицами карбида. В ходе дальнейших исследований было выявлено многократное увеличение прочности наноструктурированной стали, а также ее сопротивления хрупкому разрушению. Уровень полученных механических свойств и факторы, определяющие положительное влияние нанодиспергирования структуры на

свойства стали, рассмотрены нами, например, в работах [4, 5]. Следует ожидать, что наноструктурированная сталь 09Г2С будет иметь и хорошие трибологические свойства, так как одним из наиболее перспективных путей создания оптимальных по износостойкости сплавов является разработка гетерогенных структур на основе систем «матрица – мелкодисперсные упрочняющие фазы» [6]. В данной работе представлены результаты определения износостойкости низколегированной стали 09Г2С с субмикроструктурой ферритной матрицы, армированной нано- и микросферами цементита, а также результаты анализа особенностей ее трибодеструкции в условиях трения скольжения с позиций выявления факторов, ответственных за адаптивное поведение материала при нагружении трением.

Материалы, эксперименты и методы исследования

Как уже отмечалось, мелкозернистая структура, упрочненная твердыми микро- и нанофазами, была получена в низколегированной стали 09Г2С равноканальным угловым прессованием заготовок. Химический состав стали: Fe–1,34 Mn–0,64 Si–0,14 Cr–0,09 Ni–0,09 С, мас. %. Режимы обработки: РКУП при 20 °С с числом циклов 2 (режим 1); РКУП при 20 °С с числом циклов 2 и последующий отжиг в течение 1 ч при 350 °С (режим 2); РКУП при 20 °С с числом циклов 2 и последующий отжиг в течение 1 ч при 450 °С (режим 3).

Фундаментально-прикладные исследования материалов с наноструктурой подразумевают получение более полных сведений как о свойствах, так и о механизмах их формирования. Соответственно, понимание трибологических аспектов поведения сталей в ультрамелкозернистых состояниях требует не только количественной оценки износостойкости, но и выявле-

ния особенностей сопротивления такого материала разрушению в условиях трения; это позволит рекомендовать оптимальные режимы обработки для получения стабильных износостойких структур. В связи с этим основные этапы исследования полученных образцов стали 09Г2С с различным уровнем дисперсности структуры включили, помимо определения уровня износостойкости, анализ механизмов возникновения повреждений и микростроения фрикционных поверхностей на различных стадиях трибоиспытаний, а также эволюции их шероховатости.*

Исследования микроструктуры выполнены с помощью металлографических микроскопов «Neophot-32», «Axio Observer D1m» и растрового электронного микроскопа JSM-6480 LV «JEOL». Прибор JSM-6480LV использован также для изучения микростроения поверхностей трения.

Для определения механических свойств в соответствии с ГОСТ 1497-84 и 11150-84 растяжение пропорциональных плоских образцов типа I проводилось на испытательной машине UTS TestSysteme GmbH» (Lammerweg 29.D-89079 Ulm) модели UTS 20 K с механическим приводом при скорости деформирования 1 мм/мин и величине предельной нагрузки 1 т. Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 и 11150-84.

Испытания на износ в условиях трения скольжения выполнены на серийной машине трения СМЦ-2 по схеме «диск–палец», граничная смазка – машинное масло. Контртело – диск с газотермическим покрытием из порошка ПР-Н70Х17С4Р4 с добавлением 0,2 % CoAl_2O_4 (средняя микротвердость материала диска 9220 МПа). Частота вращения вала 5 об./с. В этих условиях нормальное давление значительно ниже предела текучести, а тепловой режим на поверхности, зависящий от мощности трения, не приводит к заметному изменению прочностных свойств материала.

Износ определяли весовым методом. Профилограммы фрикционных поверхностей получали с помощью профилометра SJ-201P по трем линиям на заранее промаркированных участках образцов. Замеры массового износа и профилометрирование проводили поэтапно через определенное число циклов трения (1500 в начале испытаний и 4500 в дальнейшем). Поверхности трения фотографировали через 4500, 18000 и 36000 циклов. Число циклов 5000 приблизительно соответствует завершению стадии приработки и началу установившегося трения.

*Более подробно структура и свойства стали 09Г2С после РКУП рассмотрены в работе [5].

Результаты и обсуждение

Влияние РКУП на структуру и свойства стали 09Г2С. Микроструктура стали в исходном состоянии (рис. 1, а) представляет собой ферритно-перлитную смесь со средним размером зерна ≈ 20 мкм. После РКУП (рис. 1, б) размер ферритных областей с субмикронной внутренней структурой ≈ 5 мкм. При последующем нагреве до 350–450 °С размер ферритных фаз уменьшается, продолжается измельчение карбидов (минимальный радиус карбидных частиц ≈ 30 нм). Наиболее эффективно процессы наноструктурирования развивались после обработки по режиму 2 (рис. 1, в). Этот режим обеспечил получение лучшей по дисперсности и однородности структуры, а также наибольший рост прочности и микротвердости стали: предел прочности составил 1400 МПа против 480 МПа для ее исходного состояния, микротвердость 2950 МПа против 1470 МПа. Пределы прочности после обработки по режимам 1 и 3 равны 1100 и 1195 МПа соответственно, значения микротвердости – 2430 МПа и 2790 МПа*.

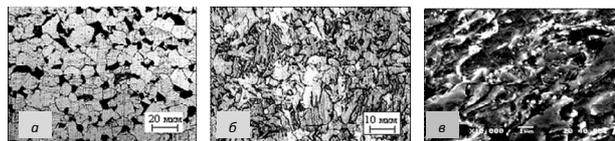


Рис. 1. Микроструктура стали 09Г2С в исходном крупнозернистом состоянии (а), в субмикронном состоянии после обработки по режиму 1 (б) и в наносубмикронном состоянии после обработки по режиму 2 (в)

Влияние РКУП на износостойкость образцов стали 09Г2С. Ведущая роль при износе материалов отводится структурным факторам, причем не только характеристикам первоначальной структуры материала, но и особенностям структурного состояния активного слоя, формирующегося в ходе изнашивания и в значительной степени определяющего трибологические свойства металла. Поскольку формирование активного слоя связано с протекающей при контактом нагружении пластической деформацией, износостойкость зависит от факторов, влияющих на сопротивление деформации – от твердости феррита, дисперсности и распределения частиц карбидной фазы. Структурам, организованным по типу «субмикроструктурная ферритная матрица, армированная дисперсными карбидами», свойственен высокий уровень невосприимчивости к локальным сдвиговым неустойчивостям [7]. Это объясняют сочетанием различных факторов упрочнения: за счет малого размера зерна, наличия структурных барьеров в виде субгранул и границ зерен, а также за счет упрочнения дисперсной карбидной фазой. Поэтому следует ожидать, что при воздействии определенной трибонагрузки износостойкость стали, обработанной по режимам 2 и 3, будет выше, чем

у крупнозернистого материала или находящегося в состоянии сразу после РКУП. К примеру, авторами работы [8] рост служебных характеристик стальных изделий был отмечен за счет наноструктурирования уже только приповерхностных слоев материала.

Результаты испытаний на трение образцов стали 09Г2С после трех видов диспергирующей обработки представлены на рис. 2. Как и следовало ожидать, появление наноразмерных элементов в исходной субмикроструктурной структуре значительно улучшило показатели износостойкости по массовому износу в 2,5–2,75 раза. Лучшую износостойкость продемонстрировала сталь, обработанная по режиму 2, обеспечившему, как было показано выше, наибольший рост прочности и микротвердости.

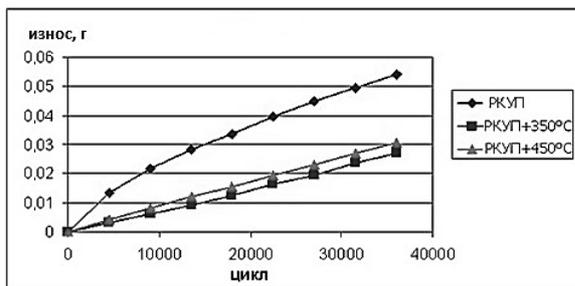


Рис. 2. Изменение значений массового износа при трении образцов стали 09Г2С в различных структурных состояниях

Микростроение фрикционных поверхностей образцов стали 09Г2С и изменение параметров шероховатости. Механизмы образования профиля фрикционного контакта изучены еще недостаточно полно ввиду сложности и многофакторности процесса, определяющегося действием как периодических факторов, так и многочисленных случайных возмущений. Исходная шероховатость состоит из совокупности различных по величине и геометрии микровыступов, вследствие чего наиболее интенсивные нагрузки, вызывающие деформацию, испытывают высокие микровыступы. Очевидно, что особенности процесса изменения величины микронеровностей зависят от особенностей структуры и физико-механических свойств сопрягаемых поверхностей.

Как отмечалось в методической части работы, для анализа эволюции шероховатости фрикционных поверхностей проводили профилометрирование образцов стали в различных структурных состояниях через определенное число циклов трения. На рис. 3 для примера приведено макроизображение участка поверхности трения с соответствующей профилограммой.

Для оценки шероховатости использованы известные формулы ее параметров [9]:

среднеарифметическое отклонение профиля

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i|$$

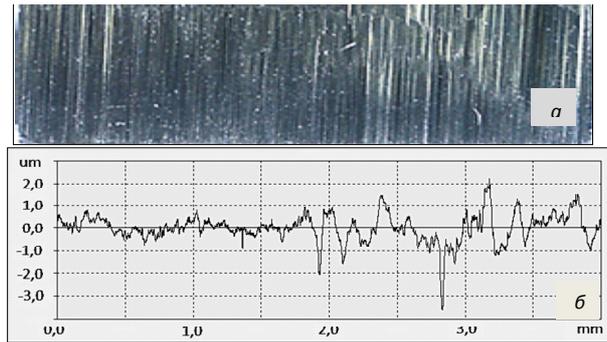


Рис. 3. Макроповерхность трения (а) образца стали 09Г2С, обработанной по режиму 3, и ее профилограмма (б). Число циклов трения 36000

высчитывается как среднеарифметическое абсолютных значений отклонения профиля (Y_i) от базовой линии; здесь N – число измерений;

среднеквадратичное отклонение профиля Rq в рамках базовой длины рассчитывают по формуле

$$Rq = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}};$$

высоту микронеровностей профиля Rz определяют как среднее от 5 наибольших максимумов профиля и среднее 5 наименьших минимумов профиля относительно средней линии.

Также были построены автокорреляционные функции шероховатости с шагом $l = 0, 10, 20, \dots, 490$ мкм. Как известно, математической мерой автокорреляции двух случайных величин служит коэффициент линейной корреляции Пирсона

$$k = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x – шероховатость; y – та же шероховатость, но с шагом l ; $Cov(x, y)$ – ковариация между переменными x, y ; σ_x, σ_y – стандартные отклонения для переменных x, y ; \bar{x}, \bar{y} – средние арифметические переменных x, y .

Обобщенные графики изменения параметров шероховатости с ростом числа циклов трения (рис. 4) показывают, что профилограммы всех образцов отличаются друг от друга по уровню сглаженности на разных этапах испытаний. Это подтверждается особенностями микростроения типичных участков поверхностей износа образцов стали с различной структурой (рис. 5). Подробный анализ макро- и микроизображений подтверждает, что на фрикционных поверхностях нетермообработанной стали (т.е. после режима 1) формируется более грубый рельеф до-

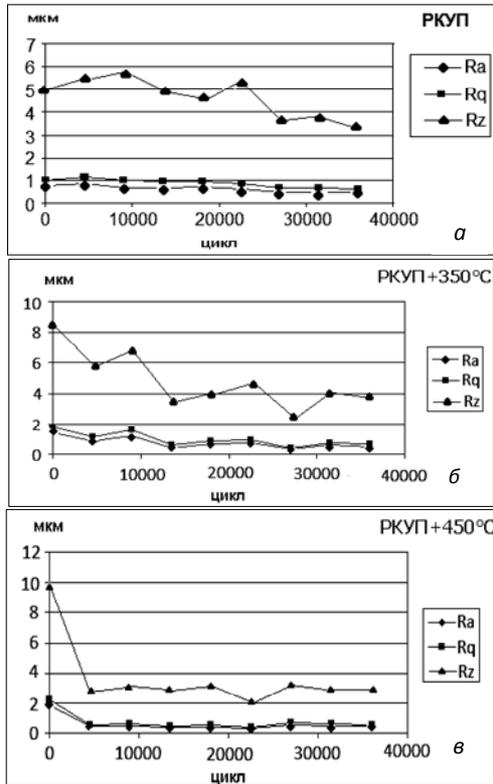


Рис. 4. Изменение параметров шероховатости образцов по пути трения в зависимости от вида обработки стали: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

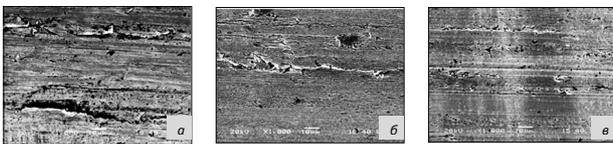


Рис. 5. Типичное микростроение поверхности износа образцов стали, испытанных при числе циклов трения 18000: а – сталь после РКУП; б – сталь после обработки РКУП+350°С; в – сталь после обработки РКУП+450°С; $\times 1000$

рожек трения с вырывами, наростами, отслоениями, наволакиваниями материала. Поверхность трения наиболее износостойкого материала в состоянии после РКУП+350°С имеет менее выраженный рельеф с относительно ровными дорожками трения и более тонкими бороздками. Заметны процессы закатывания образовавшихся ранее борозд. Появление плосковершинных микронеровностей означает нарастание опорной поверхности между образцом и контртелом, что уменьшает контактные давления и деформации и объясняет лучшую износостойкость стали, структурированной по режиму 2. Следует также отметить колебательный характер изменения величин R_a , R_q , R_z по всему пути трения для данного состояния стали (рис. 4, б). Для образцов двух других структурных состояний графики изменения этих параметров выглядят более

монотонными. Отличительная особенность процесса износа материала, обработанного по режиму 3 – интенсивное упрочнение активного слоя на стадии приработки. Выявленная цикличность и значительный уровень перепадов высотных характеристик при трибонагрузке материала с наиболее дисперсной структурой свидетельствуют о том, что в этом случае самоорганизация структуры и, соответственно, развитие трибодеструкции отличаются от аналогичных процессов для материала с менее диспергированной структурой.

Исследование автокорреляционных функций шероховатости (АКФ) фрикционных поверхностей образцов стали 09Г2С. Для анализа особенностей развития триборазрушения в наноструктурированной стали были рассчитаны АКФ профилеграмм на различных этапах износа образцов. Анализ АКФ дает возможность судить не только о различии уровней изнашивания, но также о взаимодействии микроучастков, разделенных различными интервалами (шагами). Меньший размер радиуса r АКФ указывает на меньшее влияние истираемых микрообластей друг на друга и, соответственно, на слабое взаимодействие их полей деформаций. При большем радиусе АКФ процессы истирания происходят с определенным уровнем взаимосвязанности.

Анализ изменения корреляционных зависимостей по пути трения показал, что у образцов после РКУП области взаимного влияния процессов, сопровождающих изнашивание, локализованы в пределах ≈ 100 мкм. У стали после обработки по режиму 2 взаимосвязанность и масштаб взаимосвязанных участков активного слоя значительно выше: $\approx 250 \dots 300$ мкм. Это означает, что трибонагрузка воспринимается сравнительно крупными зонами активного слоя поверхности трения. Для стали после обработки по режиму 3, которая, как отмечалось выше, интенсивно упрочняется на начальном этапе испытаний, наблюдается изменение радиуса АКФ по пути трения. Первоначально r имеет высокое значение, равное ≈ 250 мкм, но по мере приработки и выхода на стационарную шероховатость снижается до 100 мкм.

Полученные результаты указывают на то, что при протекании процессов деформирования и повреждения поверхностных слоев образцов в них происходит самоорганизация структуры, обеспечивающая более или менее эффективную диссипацию энергии. Определяющим фактором для изнашивания является формирование неких мезоскопических объемов, от масштаба которых зависит сопротивление действию триборазрушения. Структура материала после обработки

по режиму РКУП + 350 °С обладает стабильностью при использованных условиях испытаний, в материале после режима РКУП + 450 °С идет образование устойчивых вторичных структур по механизму структурной приспособляемости, а структура субмикронного материала (РКУП без отжига) более ограничена в возможности адаптации к условиям истирания.

Различие кинетики процессов изнашивания исследуемых образцов подтверждается графиками изменения радиуса АКФ по пути трения (рис. 6). Видно, что трибонагрузку в наиболее диспергированном материале после РКУП + 350 °С воспринимают весьма объемные структурные мезообразования.

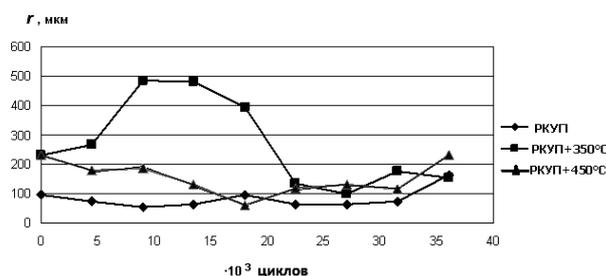


Рис. 6. Изменение радиуса АКФ шероховатости поверхностей трения в процессе износа образцов стали 09Г2С в различных структурных состояниях

Интересным представляется тот факт, что, несмотря на все начальные различия в характере и механизмах изнашивания, начиная с числа циклов 22500, все три материала имеют близкие радиусы АКФ. Это может означать, что существует определенный масштаб структурной организации, отвечающий стадии устойчивого изнашивания исследованных материалов в данных условиях трибонагружения. Следует полагать, что в основе природы высокой прочности и износостойкости наноструктурированной стали лежит способность объемного восприятия нагрузки (не микрообъемами, а мезо- и даже макрообъемами). Сильноразориентированные субзеренные и межкристаллитные границы в сочетании с карбидной нанофазой обеспечивают распределение действующих нагрузок по всему объему образца и стабилизируют структуру относительно деформационных изменений, что отодвигает стадию наступления критических уровней деформации при трении.

Выводы

1. Показано, что наноструктурирование крупнозернистой ферритно-перлитной стали 09Г2С и создание в ней гетерогенной структуры системы «субмикронная ферритная матрица, армированная нано- и микроразмерной карбидной фазой» позволяет более чем в 2,5 раза повысить

износостойкость. Наилучшее сопротивление стали износу обеспечило структурирование по режиму холодного (при 20 °С) РКУП с последующим отжигом при 350 °С.

2. Выявлены следующие особенности кинетики изнашивания, указывающие на существенные различия в природе формирования трибологической прочности стали в зависимости от уровня дисперсности структурных элементов:

сталь с наименьшей износостойкостью и субмикроструктурной структурой (в состоянии сразу после РКУП) на стадии приработки имеет наиболее интенсивное изнашивание; на стадии установившегося трения изнашивание носит более монотонный характер;

сталь с наибольшей износостойкостью, субмикронной матрицей и сравнительно равномерно распределенными нано- и микросферами карбидной фазы (в состоянии после РКУП и отжига при 350 °С) на стадии приработки имеет наименьшую интенсивность изнашивания и наиболее быстро переходит от стадии приработки к установившемуся трению;

сталь с промежуточным значением износостойкости, субмикронной матрицей и менее однородно распределенными микро- и нанокарбидами (в состоянии после РКУП и отжига при 450 °С) на стадии приработки претерпевает упрочнение, что улучшает ее сопротивление износу; в результате при установившемся трении интенсивность изнашивания стали снижается, а развитие процессов износа имеет стабильный характер.

3. Принципиально значимым фактором для повышения износостойкости стали наноструктурированием является упрочнение субмикронной матрицы равномерно распределенными нано- и микросферами карбидной фазы. Положительное влияние такой структуры обусловлено ее способностью к самоорганизации в виде динамических мезообъемных образований, обеспечивающих взаимосвязанное протекание трибологических изменений в соседних участках активного слоя поверхности трения, что улучшает сопротивление материала развитию износа. Увеличение масштаба мезообъемов со взаимосвязанным развитием процессов изнашивания способствует росту износостойкости.

Литература

1. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.И. и др. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–123.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

3. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Формирование наноразмерных элементов структуры при низкотемпературной рекристаллизации ферритно-перлитной стали после интенсивной холодной деформации // Пленарные доклады IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. – 304 с.

4. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г., Борисова М.З. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали // Перспективные материалы. – 2011. – №13. – С. 961–967.

5. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Роль наноструктурирования в повышении механических

свойств низколегированных сталей // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

6. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.

7. Hirth I.P., Rigney D.A. The application of dislocation concepts in friction and wear. Dislocation in Solids /Edited by F.R.N. Nabarro. – 1983. – V. 6, ch. 25. – P. 3–54.

8. Макаров А. В., Коришунов Л. Г., Выходец В. Б. и др. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на химический состав, структуру и трибологические свойства высокоуглеродистой стали // Физика металлов и металловедение. – 2010. – № 5. – Т.110. – С.1–15.

9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбатов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Поступила в редакцию 07.08.2015

УДК 621.791

Импульсно-дуговая наплавка для восстановления изношенных деталей

Н.И. Голиков*, Ю.Н. Сараев**, О.И. Слепцов*, К.В. Степанова*, С.В. Семенов*

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

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Проведены сравнительные экспериментальные исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры наплавленных слоев сварочного электрода марки УОНИ-13/55, полученных электродуговой наплавкой на постоянном и модулированном токах. Показано, что наплавленные слои металла, полученные импульсно-дуговой наплавкой, имеют повышенное содержание марганца и значений ударной вязкости, а также более мелкозернистую структуру по сравнению с ручной дуговой наплавкой на постоянном токе. Установлено, что микротвердость наплавленного слоя, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, имеет более сглаженный вид по сравнению с наплавкой на постоянном токе. Для повышения прочности и надежности при восстановлении геометрических размеров изношенных деталей горнодобывающей техники может быть использована технология импульсно-дуговой наплавки.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, наплавленный слой, химический состав, ударная вязкость, микроструктура, феррит, перлит, микротвердость.

The results of comparative pilot studies of chemical composition, mechanical characteristics and a microstructure of weld overlays on the welding electrode UONI-13/55 received by electric arc overlaying on the direct and modulated currents are presented. It is shown that the overlaid metal layers received by pulsed arc welding have the raised content of manganese and of resilience, and also more fine grained structure in comparison with the layers produces by manual arc fusing on a direct current. It is established that the microhardness of the weld overlay performed by pulse arc fusing has more rounded appearance, in comparison with fusing on a direct current. It is concluded that for the increase of durability and reliability at recovery of geometrical sizes of worn-out details of mining technique the technology of pulse arc overlaying can be used.

Key words: pulsed arc welding, build-up layer, chemical composition, resilience, microstructure, ferrite, pearlite, microhardness.

*ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с., n.i.golikov@mail.ru; **САРАЕВ Юрий Николаевич – д.т.н., доцент, в.н.с. litsin@ispms.tsc.ru; *СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич – д.т.н., проф., o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru; *СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна – н.с., kseniastepanova@gambler.ru; *СЕМЁНОВ Сергей Владимирович – инженер 1-й категории s1789@mail.ru.

3. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Формирование наноразмерных элементов структуры при низкотемпературной рекристаллизации ферритно-перлитной стали после интенсивной холодной деформации // Пленарные доклады IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. – 304 с.

4. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г., Борисова М.З. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали // Перспективные материалы. – 2011. – №13. – С. 961–967.

5. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Роль наноструктурирования в повышении механических

свойств низколегированных сталей // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

6. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.

7. Hirth I.P., Rigney D.A. The application of dislocation concepts in friction and wear. Dislocation in Solids /Edited by F.R.N. Nabarro. – 1983. – V. 6, ch. 25. – P. 3–54.

8. Макаров А. В., Коршунов Л. Г., Выходец В. Б. и др. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на химический состав, структуру и трибологические свойства высокоуглеродистой стали // Физика металлов и металловедение. – 2010. – № 5. – Т.110. – С.1–15.

9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбатов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Поступила в редакцию 07.08.2015

УДК 621.791

Импульсно-дуговая наплавка для восстановления изношенных деталей

Н.И. Голиков*, Ю.Н. Сараев**, О.И. Слепцов*, К.В. Степанова*, С.В. Семенов*

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

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Проведены сравнительные экспериментальные исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры наплавленных слоев сварочного электрода марки УОНИ-13/55, полученных электродуговой наплавкой на постоянном и модулированном токах. Показано, что наплавленные слои металла, полученные импульсно-дуговой наплавкой, имеют повышенное содержание марганца и значений ударной вязкости, а также более мелкозернистую структуру по сравнению с ручной дуговой наплавкой на постоянном токе. Установлено, что микротвердость наплавленного слоя, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, имеет более сглаженный вид по сравнению с наплавкой на постоянном токе. Для повышения прочности и надежности при восстановлении геометрических размеров изношенных деталей горнодобывающей техники может быть использована технология импульсно-дуговой наплавки.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, наплавленный слой, химический состав, ударная вязкость, микроструктура, феррит, перлит, микротвердость.

The results of comparative pilot studies of chemical composition, mechanical characteristics and a microstructure of weld overlays on the welding electrode UONI-13/55 received by electric arc overlaying on the direct and modulated currents are presented. It is shown that the overlaid metal layers received by pulsed arc welding have the raised content of manganese and of resilience, and also more fine grained structure in comparison with the layers produces by manual arc fusing on a direct current. It is established that the microhardness of the weld overlay performed by pulse arc fusing has more rounded appearance, in comparison with fusing on a direct current. It is concluded that for the increase of durability and reliability at recovery of geometrical sizes of worn-out details of mining technique the technology of pulse arc overlaying can be used.

Key words: pulsed arc welding, build-up layer, chemical composition, resilience, microstructure, ferrite, pearlite, microhardness.

*ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с., n.i.golikov@mail.ru; **САРАЕВ Юрий Николаевич – д.т.н., доцент, в.н.с. litsin@ispms.tsc.ru; *СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич – д.т.н., проф., o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru; *СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна – н.с., kseniastepanova@ Rambler.ru; *СЕМЁНОВ Сергей Владимирович – инженер 1-й категории s1789@mail.ru.

Введение

Эксплуатация горнодобывающей техники в экстремальных природно-климатических условиях Севера предъявляет особые требования к рабочим элементам машин и механизмов. Характерными следствиями изнашивания режущих деталей землеройной техники являются возрастание усилия резания грунта, нагрузок на отдельные детали и машину в целом, снижение производительности труда, увеличение простоев и затрат на ремонт изношенных деталей. Наблюдается повышенный износ деталей буровой и землеройной техники, эксплуатируемой в горнодобывающей промышленности Севера. Применяемые рабочие элементы землеройной техники весьма дорогостоящи, поэтому актуально решение проблем повышения их износостойкости, восстановления, а также разработки и внедрения эффективных технологий упрочнения и ремонта [1, 3].

Важнейшими факторами, определяющими эксплуатационную надежность вышеперечисленной техники, являются свойства материалов их рабочих поверхностей [10]. К свойствам этих поверхностей, в зависимости от условий их эксплуатации, предъявляют определенные требования по износостойкости, коррозионной стойкости, хладноломкости и др. Увеличение размеров оборудования, повышение его быстродействия и производительности сопровождаются ужесточением условий работы его узлов и механизмов.

Анализ практики мирового промышленного производства показывает, что для улучшения эксплуатационных показателей быстроизнашивающихся деталей и изделий в основном применяют различные виды наплавки, в том числе ручную дуговую металлическим электродом, полуавтоматическую и автоматическую дуговую порошковой проволокой или проволокой сплошного сечения с защитой дуги газом или флюсом, плазменно-порошковую, электрошлаковую, вибродуговую, газовую ручную, газовую автоматическую и др. [2, 4, 5, 13].

Исследования в указанном направлении особенно интенсивно выполнялись в 50–70-х годах двадцатого столетия. Безусловными лидерами данного направления исследований были ученые бывшего Советского Союза. Однако, если в исследовательских и производственных организациях Советского Союза основное внимание уделялось разработке новых технологических решений, созданию специализированного оборудования и материалов, то за рубежом – средствам механизации и автоматизации разработанных в СССР способов сварки и наплавки [11, 12].

Вместе с тем особенности ремонтного производства требовали нетрадиционного подхода при восстановлении и упрочнении быстроизна-

шивающихся деталей и изделий. Так, например, удаленность предприятий, использующих горнодобывающую технику: коронки рыхлителей, зубья ковшей и др., потребовала широкого применения ручной дуговой наплавки, как наиболее простого и эффективного способа ремонтно-восстановительной и упрочняющей обработки её рабочих поверхностей.

Как правило, ручная дуговая наплавка осуществлялась покрытыми электродами на постоянном токе. Вместе с тем выбор технологии наплавки и рецептурного состава материала покрытия для конкретных условий эксплуатации до сих пор является сложной научно-технической задачей, поскольку восстановленные детали с применением традиционных технологий на постоянном токе по сравнению с новыми расходными изделиями имели малый ресурс и быстро выходили из строя.

Частично её решение можно было бы осуществить путем изготовления деталей целиком из износостойкой легированной стали. Однако такой путь представляется экономически неоправданным в связи с трудностью обработки таких изделий и высокой себестоимостью изделия в целом. В целом к настоящему времени традиционные стационарные процессы сварки и наплавки (электродуговая, электрошлаковая, плазменная) практически исчерпали свои технологические возможности. Концентрация энергии сварочных источников нагрева не решила, да и не может решить многих проблем, в том числе проблемы производительности и улучшения качества сварки.

Наиболее перспективным направлением совершенствования технологий, позволяющих решать такие задачи, обладают импульсные технологии наплавки: плазменная, электрошлаковая, электродуговая [7–9].

Ранее на основе экспериментальных исследований было установлено, что наиболее эффективными методами упрочняющих покрытий на рабочие органы быстроизнашивающихся деталей являются адаптивные импульсные технологии наплавки, реализуемые специализированным оборудованием, имеющим блочно-модульный принцип построения, обеспечивающим возможность дозирования энергии, стабилизации мгновенных значений основных энергетических параметров процесса наплавки и контроля качества (стабильности) технологического процесса. По сравнению со стационарными адаптивными импульсными технологиями наплавки обеспечивают [8]:

- управление процессами плавления, переноса и кристаллизации металла сварочной ванны при значительно меньших средних значениях тех-

ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

нологических параметров (сварочный ток, дуговое напряжение, мощность отдельного микроцикла);

- увеличение скорости кристаллизации сварочной ванны вследствие нестационарного энергетического воздействия источника нагрева на сварочную ванну, уменьшающего температуру расплавленного металла;

- уменьшение степени деформационных процессов в наплавленных поверхностях; повышение качественных характеристик наносимого покрытия (однородности химического состава по всему объему покрытия и механических свойств).

Отмеченные достоинства достигаются направленной кристаллизацией сварочной ванны и усилением гидродинамических процессов в расплавленном металле, способствующим интенсивной дегазации сварочной ванны и равномерному распределению легирующих элементов по всему объему расплава.

При импульсно-дуговой наплавке на основной сварочный ток непрерывно горящей дуги налагают кратковременные импульсы тока, которые ускоряют перенос капель металла и позволяют контролировать размер переносимых капель. При наложении на дугу импульсов определенной энергии и частоты достигается управляемый перенос электродного металла с минимальным разбрызгиванием. Это позволяет осуществлять наплавку в различных пространственных положениях [6].

Важным достоинством импульсных процессов является возможность стабилизации мгновенных значений основных технологических параметров интервала плавления и переноса каждой капли электродного металла. Это становится возможным благодаря наличию каналов обратных связей, контролирующих состояние объекта управления по основным мгновенным значениям технологических параметров, несущим наибольшую информацию, например дуговому напряжению, сварочному току, средней мощности отдельного микроцикла, энергии, затраченной на плавление отдельной капли электродного металла [9].

Перечисленные преимущества легли в основу концепции широкого практического применения методов импульсно-дуговой наплавки. Однако поведение таких покрытий, особенно в специфических условиях эксплуатации при низких климатических температурах, до сих пор является мало изученным.

Цель работы: изучение свойств наплавленных покрытий методами адаптивной импульсно-дуговой наплавки электродами марки УОНИ 13/55 на изделиях быстроизнашивающегося оборудования землеройной, буровой, строи-

тельно-дорожной и горнодобывающей техники, работающей при низких климатических температурах.

Материалы и методы исследования

Для получения наплавленных слоев использовались сварочные аппараты «ДУГА-318М1» – для ручной дуговой сварки и наплавки на постоянном токе и инверторный источник питания «ФЭБ-315 МАГМА», реализующий адаптивный импульсно-дуговой режим сварки и наплавки, на модулированном. Электродуговую наплавку проб в восемь слоев в нижнем положении производили электродами марки УОНИ-13/55 \varnothing 4 мм производства «Лосиноостровский электродный завод» на пластины размерами 120x80x18 мм. Марка стали наплаваемых пластин – СтЗсп.

Образец №1 наплавлен на постоянном токе, образец №2 получен с помощью импульсно-дуговой наплавки. Известно, что сварочные электроды марки УОНИ-13/55 предназначены для ручной дуговой сварки особо ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. По данным работы [7], наиболее эффективный частотный диапазон, обеспечивающий уменьшение структурных составляющих в зонах сварного соединения при сварке модулированным током низколегированных сталей, лежит в пределах от 1 до 2,5 Гц. В связи с этим импульсно-дуговая наплавка образцов произведена с частотой 1,67 Гц. Режимы электродуговой наплавки на постоянном и модулированном токах представлены в табл. 1 и 2. Показано, что импульсно-дуговая наплавка проведена с меньшей погонной энергией (на 17 %).

Т а б л и ц а 1

Режимы ручной дуговой наплавки образца №1 на постоянном токе

$I_{св}$, А	$U_{св}$, В	Время за один проход, с	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия, кДж/м
164	27,5	75	7,71	1916,75

Т а б л и ц а 2

Режимы импульсно-дуговой наплавки образца №2

$I_{ш}$, А	$t_{ш}$, А	$I_{п}$, А	$t_{п}$, А	$U_{св}$, В	Время за один проход, с	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия за один слой, кДж/м
200	0,2	50	0,4	25	90	6,00	1593,75

Химический состав основного и наплавленного металла образцов № 1 и 2 определен стационарным оптико-эмиссионным анализатором химического состава металлов и сплавов «Foundry-Master» по ГОСТ 18895-97. Металлографические исследования проводили с применением оптического микроскопа МЕТАМ РВ-21. Срезы образцов схематично были поделены на зоны 1,2,3,4 с соответствующими снимками микроструктур (рис. 1).

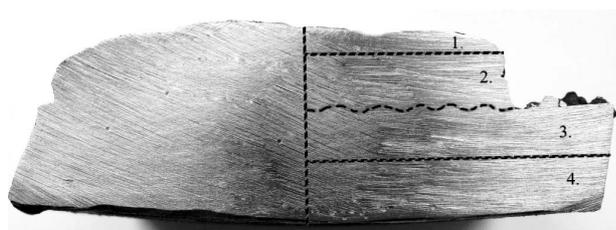


Рис. 1. Схема зон образца с наплавленным слоем

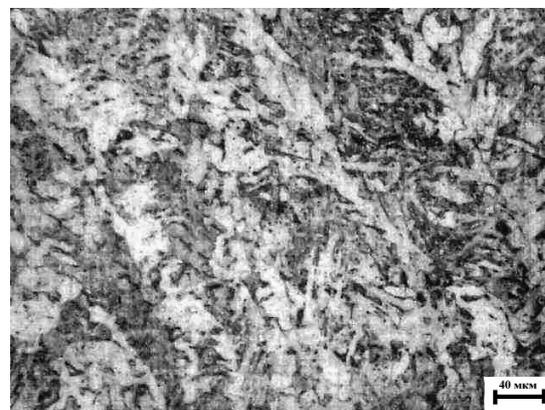
Исследование микротвердости осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г и продолжительности выдержки 10 с. Расстояние между отпечатками 300 мкм. Ударный изгиб образцов проведен с помощью инструментированного маятникового копра Amsler RKP 450 при температурах испытания ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). С наплавленных слоев металла были изготовлены образцы для ударного изгиба с V-образным надрезом по ГОСТ 6996-66 тип IX.

Результаты и обсуждение

Химический анализ показал, что содержание марганца в наплавленном металле образца № 1, выполненного ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, меньше на 0,129 %, чем в наплавленном металле образца №2, выполненного с помощью импульсного режима наплавки (табл. 3). Это говорит о возможном выгорании марганца в результате более интенсивного нагрева и плавления наплавленного металла шва при ручной дуговой наплавке на постоянном токе.

Микроструктура металла верхнего слоя наплавки (зона 1) имеет литую ферритно-перлитную дендритную структуру и состоит из кристаллов столбчатой формы (рис.2). Кристаллизация металла шва протекала при одновременном его подогреве со стороны источника

тепла и быстрое охлаждение за счет интенсивного теплоотвода в относительно холодный металл нижних слоев. Наблюдается крупнозернистая структура с ферритными образованиями иглообразной формы. Столбчатые образования



а



б

Рис. 2. Микроструктура наплавленных слоев зоны 1, выполненных НМТ (а) и НПТ (б), $\times 500$

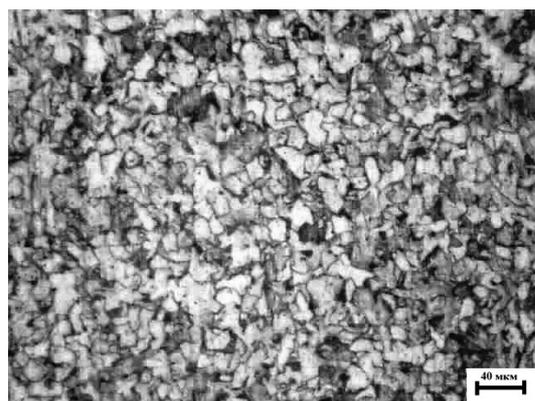
в наплавленном слое, выполненном электродуговой наплавкой на постоянном токе (НПТ), имеют более грубую форму (рис.2, б), сплошные колонии феррита занимают большую площадь, чем феррит в шве, выполненном наплавкой на модулированном токе (НМТ) (рис. 2, а).

Металл в зоне 2 имеет ферритно-перлитную структуру, зерна феррита разоориентированы, имеют неправильную форму. Ферритные зерна наплавленного металла, выполненного НМТ (рис. 3, а), визуально мельче ферритных зерен образца №1, выполненного НПТ (рис. 3, б).

Т а б л и ц а 3

Химический состав наплавленного металла

Образец	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Ti
№1	98,6	0,0528	0,343	0,666	<0,003	0,0054	0,0581	0,0167	0,0543	0,0012	0,0131	0,0833	0,0052
№2	98,6	0,0522	0,382	0,795	<0,003	<0,003	0,0498	0,0095	0,0252	0,001	0,013	0,03	0,0028



а



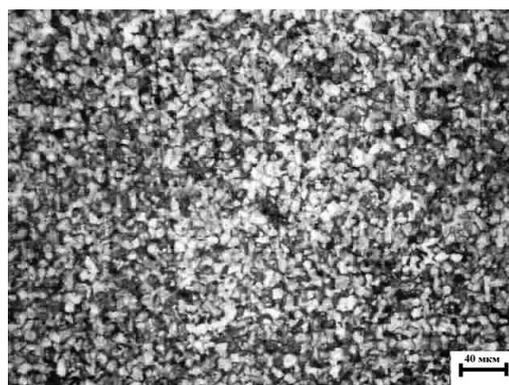
б

Рис. 3. Микроструктура зоны 2 образцов, выполненных НМТ (а) и НРТ (б), $\times 500$

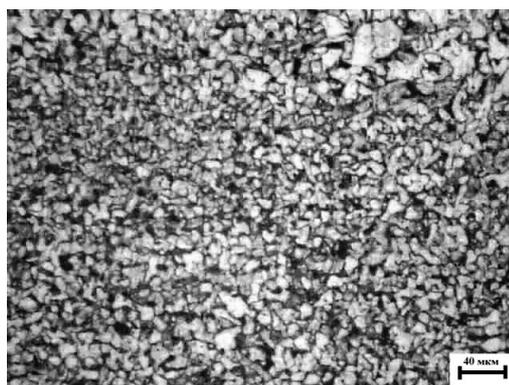
На участке нормализации в зоне термического влияния (ЗТВ) в процессе полной перекристаллизации в аустенит образовалась мелкозернистая (сорбитообразная) структура, которая обеспечивает более высокие механические свойства стали по сравнению со свойствами других участков зоны термического влияния. Местами наблюдаются крупные зерна феррита на структуре образца с наплавкой, выполненной при НРТ (рис.4, б).

На участке неполной перекристаллизации ЗТВ (рис. 5) процесс измельчения зерна происходил только за счет перекристаллизации той части структуры, которая занята была перлитом, а размер зерен феррита не изменился. Поэтому сталь на этом участке состоит не только из мелких зерен, но и отдельных крупных зерен феррита. Сталь с разнотернистым строением имеет более низкие механические свойства, чем мелкозернистая сталь.

Исследования микротвердости показали, что у образца №2, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, микротвердость варьирует от 2337 МПа в зоне столбчатых образований до 1611 МПа в зоне металла подложки. В зоне мелкого зерна наплавленного слоя выявлено значение микротвердости 1833 МПа. В зоне

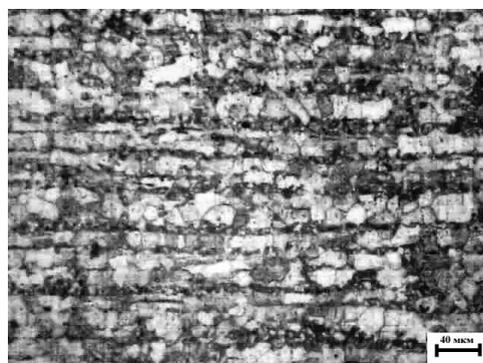


а

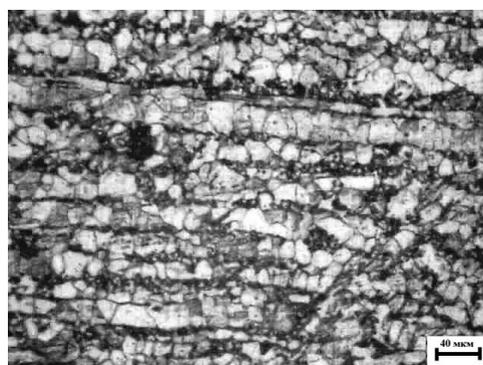


б

Рис. 4. Микроструктура зоны 3 образцов, выполненных НМТ (а) и НРТ (б), $\times 500$



а



б

Рис. 5. Микроструктура зоны 4 образцов, выполненных НМТ (а) и НРТ (б), $\times 500$

столбчатых образований наплавленного слоя, полученного ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, микротвердость имеет значение 3080 МПа, что говорит о значительном перегреве металла. В зоне мелкого зерна наплавленного металла выявлено значение микротвердости 1640 МПа (рис. 6).

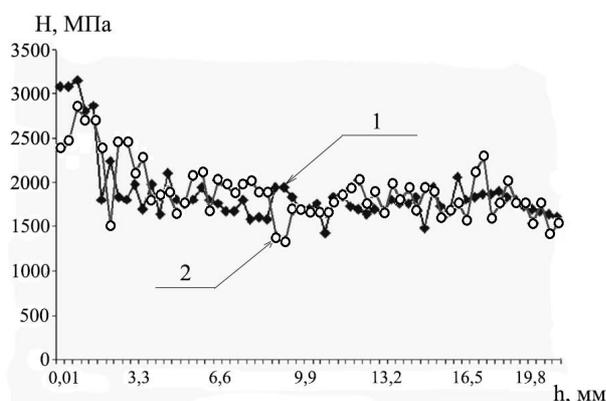


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине наплавленных слоев: 1 – НПТ; 2 – НМТ

По результатам ударных испытаний показано, что средние значения ударной вязкости (KCV) наплавленного металла электродов марки УОНИ-13/55, полученных импульсно-дуговой наплавкой (НМТ) при комнатной температуре (20 °С) больше примерно на 7,5 %, а при отрицательной температуре (-60 °С) на 21,5 %, чем после ручной дуговой наплавки на постоянном токе (НПТ) (рис. 7).

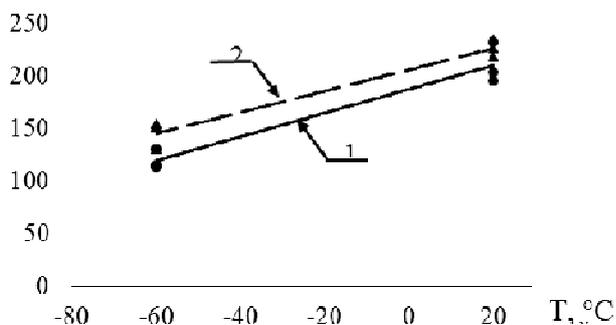


Рис. 7. Зависимость ударной вязкости образцов наплавленного металла от температуры: 1 – НПТ; 2 – НМТ

Выводы

1. Химический анализ наплавленных слоев показал, что содержание марганца в наплавленном металле образца № 1 после ручной дуговой наплавки на постоянном токе меньше на 0,129 %, чем в образце № 2, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, что говорит о более интенсивном выгорании марганца при ручной дуговой наплавке на постоянном токе.

2. Металлографический анализ наплавленных слоев показал, что микроструктура столб-

чатых образований на поверхностных наплавленных слоях, полученных ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, имеет более грубую форму, сплошные колонии феррита занимают большую площадь, чем феррит в шве, выполненном наплавкой на модулированном токе. В нижних наплавленных слоях ферритные зерна наплавленного металла, выполненного модулированным током, визуально мельче ферритных зерен образца № 1. Таким образом, наплавленный металл, полученный импульсно-дуговой наплавкой, имеет более мелкозернистую структуру, чем после наплавки на постоянном токе.

3. Разброс данных распределения микротвердости наплавленного слоя, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, имеет более сглаженный вид по сравнению с наплавкой на постоянном токе.

4. Ударная вязкость наплавленного металла электродов марки УОНИ-13/55, полученных импульсно-дуговой наплавкой, выше, чем после наплавки на постоянном токе.

Работа выполнена в соответствии с заданием и финансированием НИР по госконтракту № 48 от 20.10.2014 г. РС(Я) «Разработка сварочных материалов и технологий их применения при наплавке на изделия, работающие в условиях взаимодействия с мерзлыми грунтами при климатически низких температурах (до -60 °С)».

Литература

1. Винокуров Г.Г., Яковлева С.П., Кычкин А.К. и др. Изменение структуры и изнашивание породоразрушающего элемента бульдозера при эксплуатации в условиях Севера // *Металлы*. – 2009. – №5. – С. 74–80.
2. Воротников В.Я., Артеменко Ю.А., Иванов С.В., Калуцкий В.В. Технология объемного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов // *Сварочное производство*. – 1979. – № 3. – С. 9–10.
3. Голощанов Г.А., Лиошенко В.И., Володарец В.А., Поляков В.О. Разработка методов по упрочнению изношенных деталей транспортных средств // *Материалы 64-й научн.-техн. конф. ГОУ «СибАДИ» в рамках юбилейного Межд. конгресса «Креативные подходы в образовательной, научной и производственной деятельности»*. – Омск, 2010. – С. 7–11.
4. Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н., Морозкин И. С. Прогрессивные технологии восстановления деталей подвижного состава железных дорог // *Сварочное производство*. – 2008. – № 1. – С. 21–24.
5. Каленский В. К., Гладкий П. В., Фруммин И. И. Исследование и разработка способа автома-

ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

тической наплавки выпускных клапанов автомобилей // Автоматическая сварка. – 1963. – № 1. – С. 15–23.

6. Ларионов В.П., Слепцов О.И., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // Вестник Академии военных наук. – 2008. – №3. – С.67–69.

7. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Влияние энергетических параметров процессов сварки на структуру и свойства зон сварных соединений низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2012. – №8. – С.3–5.

8. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука, 1994. – 108 с.

9. Сараев Ю.Н. Управление переносом электродного металла при дуговой сварке с корот-

кими замыканиями дугового промежутка // Автоматическая сварка. – 1988. – №12. – С.16–23.

10. Хасуи А. Наплавка и напыление / Хасуи А. и Моригаки О. Пер. с японского В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

11. Herman A. Nied, Radhakisan S. Baheti Arc welding process control sistem / United States Patent # 4,613,743. Date of Patent: Sep. 23, 1986.

12. Tobias Rosado, Pedro Almeida, Inês Pires, Rosa Miranda and Luísa Quintino INNOVATIONS IN ARC WELDING / Procedimento Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Congresso de Engenharia de Moçambique, Mozambique, Maputo, 2–4 Setembro 2008. – P. 1–18. Artigo REF: 44A004.

13. Zuchowski R.S., Culbertson R.P. Plasma arc weld surfacing // Welding Journal. – 1962. – Vol. 41, № 6. – P. 548–555.

Поступила в редакцию 28.07.2015

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Физико-химическая биология

УДК 57.086.132:581.132

Влияние гамма-облучения и лиофилизата щирицы запрокинутой на фотосинтез проростков пшеницы

А.Н. Журавская, И.В. Воронов, Е.Р. Поскачина, И.В. Слепцов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

В целях оценки радиомодифицирующего действия биоактивных веществ из тканей щирицы запрокинутой изучено влияние предпосевого замачивания зерновок трёх сортов пшеницы, предварительно подвергнутых радиационному облучению γ -квантами ^{60}Co в диапазоне доз от 10 до 600 Гр, в 1, 2 и 4 %-х водных растворах лиофилизата, полученного из водно-спиртового экстракта *Amaranthus retroflexus* L., на фотосинтетический комплекс их 7-дневных проростков. Водно-спиртовой экстракт щирицы запрокинутой был получен последовательной экстракцией всей надземной фитомассы вначале 40 %-м водно-спиртовым раствором, а затем 70 %-м для извлечения максимального количества биоактивных веществ. Установлено, что такая предпосевная обработка семян имеет сортоспецифичную направленность и не оказывает выраженного негативного воздействия на фотосинтетические характеристики проростков. Выявлено, что 2 %-й водный раствор лиофилизата увеличил количество изученных пигментов в проростках и изменил уровень светособирающего комплекса в фотосистемах. Радиопротекторное действие лиофилизата из щирицы запрокинутой проявилось при сочетании острого γ -облучения дозой 10 Гр и предпосевого замачивания зерновок в 2 %-м лиофилизате. Усиление воздействия радиационного стресса отмечено при γ -облучении дозой 10 Гр и предпосевном замачивании зерновок в 1 %-м лиофилизате.

Ключевые слова: пшеница, фотосинтез, светособирающий комплекс, лиофилизат *Amaranthus retroflexus* L., радиационное облучение.

*In order to assess a radiomodifying action of bioactive substances from the tissues of A. retroflexus on the photosynthetic complex of 7-day-old wheat seedlings we studied the effect of pre-sowing soaking of grains of three varieties of wheat, previously exposed to γ -rays ^{60}Co in doses ranging from 10 to 600 Gy, in 1, 2, and 4% aqueous solution of freeze-dried product obtained from hydroalcoholic extract *Amaranthus retroflexus* L. The aqueous alcoholic extract of *Amaranthus retroflexus* L. was obtained by sequential extraction of all aboveground phytomass first with 40% aqueous alcohol solution, and then with 70% aqueous-alcoholic solution to extract the maximum amount of bioactive substances. It was found that the effect of variety has specific focus and has expressed no negative impact on the photosynthetic characteristics of the seedlings. It is revealed that 2% aqueous solution of the lyophilizate increased the number of pigments studied in seedlings and changed the level of light-harvesting complex in the photosystems. Radioprotective effect of the freeze-dried hydroalcoholic extract *Amaranthus retroflexus* L., manifested at combination of acute γ -irradiation of the dose of 10 Gy and pre-soaking the grains in 2% lyophilizate. Strengthening of influence of a radiation stress was observed at γ -irradiation dose of 10 Gy and pre-soaking the grains in 1% lyophilizate.*

Key words: wheat, photosynthesis, light-harvesting complex, freeze-dried *Amaranthus retroflexus* L., radiation exposure.

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна – д.б.н., проф., г.н.с., jan43@mail.ru; ВОРОНОВ Иван Васильевич – к.б.н., с.н.с., viv_2002@mail.ru; ПОСКАЧИНА Елена Рудольфовна – к.б.н., н.с., poskachinalena@yandex.ru; СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич – аспирант, negoxasg@mail.ru.

Введение

В настоящее время исследования, направленные на защиту биологических объектов от повреждающего действия ионизирующей радиации, являются актуальными. В последние десятилетия выявлена возможность повышения устойчивости живых организмов к высоким дозам радиации и изменению радиоадаптивного ответа (РАО) живых организмов с применением радиомодификаторов растительного происхождения [1].

Известно, что действие ионизирующего излучения проявляется на всех уровнях внутриклеточного биосинтеза направленного на РАО организма, например, таких как синтез и изменение активности ферментов антиоксидантной защиты, синтез растительных пигментов и др. [2]. Есть данные, что первичным проявлением токсического действия радиации при развитии проростков в процессе активного хлорофиллообразования является ингибирование синтеза пигментов [3]. Поэтому уже на начальной стадии развития растений можно оценить действие радиомодификаторов и выявить их эффективные концентрации.

Интересным объектом исследований в качестве возможного радиомодификатора является щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), широко распространенное дикорастущее растение, имеющее большой потенциал для использования в разных областях медицинского, пищевого, кормового и сельскохозяйственного направлений [4]. Щирица богата белками, углеводами, имеет высокую семенную продуктивность. В биомассе щирицы содержится вещество амарантин ($C_{29}H_{31}O_{19}$), относящееся к алкалоидам – беталаинам, которые являются природными водорастворимыми антиоксидантами. Растение содержит флавоноиды: рутин, кверцетин и др. В листьях *A. retroflexus* отмечено высокое содержание биогенного хорошо усвояемого кальция (до 5,3% в пересчете на сухую массу). Семена *A. retroflexus* L. в большом количестве содержат сквален, обладающий выраженным противоопухолевым и ранозаживляющим действием [5]. Использование экстрактов из вегетативных частей *A. retroflexus* L., содержащих физиологически активные вещества (ФАВ) антиоксидантного действия, могут модифицировать лучевую реакцию при действии острого γ -облучения на животный и растительный организмы [6].

Цель нашего исследования – выявить влияние разных концентраций лиофилизата щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) на фотосинтез проростков пшеницы сортов «Якутянка-224», «Туймаада» и «Приленская-19», выросших из γ -облученных зерновок.

Материалы и методы

В работе были использованы 7-дневные проростки зерновок пшеницы сортов «Якутянка-224», «Туймаада» и «Приленская-19», районированные к условиям криолитозоны (Центральная Якутия). Сорты имеют короткий вегетационный период (70–85 дней), засухоустойчивы, устойчивы к осыпанию, полеганию, болезням, с хорошим качеством зерна [7]. Воздушно-сухие зерновки были облучены γ -квантами ^{60}Co с мощностью экспозиционной дозы облучения 7 рад/с на установке типа «Исследователь», дозами γ -облучения: 10, 100, 200 и 600 Гр. Контролем служили не облученные и не прошедшие предпосевную обработку лиофилизатом зерновки (замоченные в дистиллированной воде).

Семена щирицы запрокинутой высевали в открытый грунт в конце мая на территории Ботанического сада ИБПК СО РАН. Сбор вегетативных частей щирицы проводили в фазе начала плодоношения (конец августа). Физиологически активные вещества последовательно экстрагировали из всей высушенной вегетативной массы щирицы 40 %-м и 70 %-м водно-спиртовыми растворами в соотношении 1:10. Растворы лиофилизировали, полученные лиофилизаты смешивали в соотношении 1:1 по массе. Зерновки пшеницы замачивали в течение 24 ч в водных растворах смеси лиофилизата, с массовой долей комплекса исследуемых веществ 1, 2 и 4%. Проращивание проводили в чашках Петри на ватно-марлевой подкладке при комнатной температуре, в 4-х повторностях по 25 зерновок в каждой. Общее содержание амарантина в лиофилизате определяли спектрофотометрически [8]. Определение концентрации хлорофилла и каротиноидов в проростках проводили на спектрофотометре Shimadzu UV 2600 (Япония) [9]. Оптическую плотность спиртового экстракта из сухих проростков пшеницы измеряли при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения хлорофиллов *a* и *b* в красной области спектра, и при длине волны абсорбционного максимума каротиноидов. Концентрацию пигментов рассчитывали по формулам [10]. Долю хлорофиллов светособирающего комплекса (ССК) рассчитывали по формуле: $[(1,2 \text{ хл.} b + \text{хл.} b) / \Sigma(\text{хл.} a + \text{хл.} b) \cdot 100\%]$ [11].

Все измерения выполнены в четырех биологических и аналитических повторностях. Результаты экспериментов представлены среднearифметическими значениями. При определении биохимических и физиологических параметров статистическая достоверность и разброс определяли путем закладки 1 %-й и 5 %-й ошибки на метод, соответственно [12].

Результаты и обсуждение

Растения в ходе своего существования подвергаются воздействию различных внешних факторов, нередко оказывающих неблагоприятное влияние. Эти факторы вызывают сдвиги в нормальных физиологических процессах и в то же время активируют системы адаптации к изменившимся условиям существования. Значительное влияние на жизнедеятельность растений оказывают такие внешние факторы, как повышенная температура и ионизирующее облучение [13]. Влияние ионизирующего излучения на живые организмы, в том числе на растения, сводится к цепочке обратимых и необратимых изменений. Важную роль в формировании биологических эффектов играют радиационно-химические изменения, обусловленные продуктами радиолиза воды. Свободные радикалы водорода и гидроксильной группы, которые обладают высокой активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка, ферментов, что неизбежно приводит к нарушению биохимических процессов в организме, возникают новые химические соединения, не свойственные организму, что вызывает нарушение деятельности отдельных функций и систем организма. При интенсивном воздействии физических факторов (например, острое γ -облучение) многократно усиливается образование активных форм кислорода, которые могут привести к срыву механизмов антирадикальной защиты, развивается окислительный стресс [14]. Химические реакции, индуцируемые свободными радикалами, развиваются с большим выходом, вовлекая в процесс сотни и тысячи молекул, не задетых излучением. В этом состоит основная специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты. Формирование стресс-реакций у растений отражается и на интенсивности фотосинтеза путем изменения синтеза пигментов и каротиноидов в проростках растительного организма. Известно, что хлорофиллы являются одним из перспективных радиомодуляторов защитного действия, изучены функции и участие фотосинтетических пигментов, каротиноидов и антоцианов в защитно-приспособительных реакциях при стрессовых воздействиях [15,16].

Показано, что хлорофилл имеет две функции – поглощение и трансформацию энергии. При этом основная часть молекул хлорофилла – более 90 %

всего хлорофилла хлоропластов входит в состав ССК. Светособирающий комплекс выполняет роль антенны, которая эффективно поглощает свет и переносит энергию возбуждения к реакционному центру. Кроме большого числа (до нескольких сотен) молекул хлорофилла ССК содержит каротиноиды, которые увеличивают эффективность усвоения света за счет того, что они поглощают свет в тех областях спектра, в которых молекулы хлорофилла поглощают свет сравнительно слабо [17].

Пигментная система растений представлена двумя типами пигментов: зелеными – хлорофиллами *a* и *b* и желтыми – каротиноидами. Основной функциональный пигмент – хлорофилл *a*. Он служит непосредственным донором энергии для фотосинтетических реакций, остальные пигменты лишь передают поглощенную ими энергию хлорофиллу *a*. У большинства высших растений содержание хлорофилла *a* в 2–3,5 раза выше, чем содержание хлорофилла *b* [18]. Существует мнение, что превышение у растений содержания хлорофилла *b* относительно хлорофилла *a* в листьях свидетельствует о неких адаптивных перестройках организма к испытываемым стрессам. Ранее было показано, что наибольший радиостимулирующий эффект у проростков (по критериям энергии прорастания и всхожести зерновок) проявляется при замачивании зерновок пшеницы в 2 %-м лиофилизате, полученным из водно-спиртового экстракта вегетативных частей щиряцы запрокинутой [6].

Известно, что многие алкалоиды представляют собой физиологически активные соединения. Амарантин – красно-фиолетовый алкалоид бетацианин, относится к бетацианиновым пигментам и является азотсодержащим гетероциклическим соединением, накапливающимся в различных органах растений. В ряде работ показано, что амарантин обладает антиоксидантными свойствами, что позволяет рассматривать его возможное использование как радиопротектора при остром γ -облучении [19]. Нами был исследован лиофилизат, полученный по авторской, описанной выше, технологической схеме. Установлено, что амарантина в лиофилизате содержится 1,3 мг/г_{лиоф} (табл.1). Следует отметить, что большинство флавоноидов, рутин и кверцетин – мало- или нерастворимы в воде. Поэтому их влияние на

Т а б л и ц а 1

Содержание некоторых биологически активных веществ в лиофилизате щиряцы запрокинутой

Смесь лиофилизатов	Амарантин, мг/г _{лиоф}	Сумма НМАО, мкг-экв _{кверц} /г _{лиоф}	Флавоноиды, мг/г _{лиоф}			Хлорофиллы, мг/г _{лиоф}		
			сумма флавоноидов	рутин	кверцетин	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
	1,3±0,01	0,4±0,01	3,5±0,01	0,7±0,01	0,06±0,01	0,5±0,01	0,2±0,01	0,7±0,01

$p < 0,01$

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ И ЛИОФИЛИЗАТА ЩИРИЦЫ ЗАПРОКИНУТОЙ НА ФОТОСИНТЕЗ

модификацию лучевой реакции незначительно, тогда как амарантин имеет высокую растворимость в воде.

Содержание хлорофиллов *a*, *b*, *a+b*, каротиноидов и значение ССК в проростках пшеницы исследованных сортов в зависимости от концентрации лиофилизата представлено в табл.2. У сорта «Якутянка-224» наблюдалось увеличение в 1,1–2,5 раза содержания хлорофиллов *a*, хлорофилла *b* – в 2,5 раза, их суммы – в 2,1–2,5 раза, каротиноидов – в 1,2–2,4 раза, уровень ССК в фотосистемах статистически достоверно не изменялся при повышении концентрации лиофилизата. Исключением был 2 %-й раствор, где выявлено увеличение доли ССК на 26,5 % относительно контроля. Замачивание зерновок пшеницы сорта «Гуймаада» в лиофилизате статистически достоверно снизило в проростках содержание всех изученных пигментов и уровень ССК в фотосистемах, кроме вариантов с замачиванием в 2 %-м и 4 %-м лиофилизате, где зафиксировано увеличение содержания каротиноидов на 21,1 % и хлорофилла *a* на 11,2 %. В проростках пшеницы сорта «Приленская-19» замачивание зерновок в 2 %-й концентрации лиофилизата наблюдалось увеличение на 18 %

содержания хлорофиллов *a*, хлорофилла *b* – на 80 %, их суммы – на 36,6 %. Уровень ССК поднялся на 31,9 % на фоне снижения на 64,1 % количества каротиноидов относительно контроля (табл.2).

Таким образом, предпосевное замачивание зерновок пшеницы различными концентрациями лиофилизата *A. retroflexus* на проростки исследованных сортов пшеницы было неодинаковым, имело сортоспецифичную направленность и не оказывало выраженного негативного воздействия на физиологические характеристики. Наибольшее воздействие при замачивании зерновок оказывал 2%-й водный раствор лиофилизата, действие которого приводило к увеличению количества изученных пигментов в проростках и к изменению уровня ССК в фотосистемах.

В табл.3 показаны содержание хлорофиллов *a*, *b*, *a+b*, каротиноидов и уровень ССК в проростках пшеницы исследованных сортов в зависимости от дозы γ -облучения зерновок. Контролем служили необлученные зерновки (табл.2). Установлено, что содержание хлорофилла *a* у проростков, выросших из зерновок, получивших дозу острого γ -облучения 10 Гр, было увеличено в 2 раза (сорт «Якутянка-224»), в 1,6 раза (сорт «Приленская-19») и на 10 % (сорт «Гуймаада»). Содержание хлорофилла *b* также превышало контрольные значения: у сорта «Якутянка-224» – в 3,3 раза, у сорта «Приленская-19» – 2,1 раза, а у сорта «Гуймаада» – на 10 %.

Содержание каротиноидов у трех сортов пшеницы незначительно повысилось у проростков, выросших из зерновок, получивших дозу 10 Гр. В проростках, выросших из зерновок, облученных дозами 100, 200 и 600 Гр, наблюдалось резкое снижение всех показателей фотосинтеза. Уровень ССК у сортов «Приленская-19» «Якутянка-224» и «Гуймаада» был зафиксирован на 4, 20 и 40 % выше контрольного значения, соответственно.

Таким образом, установлено, что острое предпосевное γ -облучение зерновок пшеницы дозой 10 Гр приводит к увеличению содержания хлорофиллов *a* и *b*. Изменяется их соотношение в сторону увеличения хлорофилла *b*, наблюдается разбалансировка соотношения *a/b*, за счет чего увеличивается уровень ССК, выполняющего роль антенны, которая эффективно поглощает свет и переносит энергию возбуждения к реакционному центру. Как было сказано выше, это может свидетельствовать о неких адаптивных перестройках организма растений к испытываемым стресс – в данном случае к γ -облучению.

Т а б л и ц а 2
Содержание хлорофиллов *a*, *b*, *a+b*, каротиноидов и уровень ССК в проростках пшеницы исследованных сортов в зависимости от концентрации лиофилизата

Концентрация лиофилизата, %	Содержание, мкг/г _{сух.тк}				ССК, %
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	Каротиноиды	
«Якутянка-224»					
0	162,0±8,1	54,0±2,7	216,0±10,8	66,0±3,3	55,0±2,8
1	171,0±8,6	53,0±2,7	224,0±11,2	69,0±3,5	52,1±2,6
2	305,0±15,3	141,0±7,1	446,0±22,3	80,0±4,0	69,6±3,3
4	397,0±19,9	136,0±6,8	533,0±26,7	156,0±7,8	56,1±2,8
«Гуймаада»					
0	293,0±14,7	121,0±6,1	414,0±20,7	89,0±4,5	64,3±3,2
1	109,0±5,5	43,0±2,2	152,0±7,6	53,0±2,7	62,2±3,1
2	276,0±13,8	96,0±4,8	372,0±18,6	108,0±5,4	56,8±2,8
4	327,0±16,4	24,0±1,2	351,0±17,6	67,0±3,4	15,0±0,8
«Приленская-19»					
0	206,0±10,3	86,0±4,3	292,0±14,6	67,0±3,4	64,8±3,2
1	206,0±10,3	94,0±4,7	300,0±15,0	49,0±2,7	68,9±3,5
2	244,0±12,2	155,0±7,8	399,0±20,0	43,0±2,2	85,5±4,3
4	213,0±10,7	73,0±3,7	286,0±14,3	81,0±4,1	56,2±2,8

$p < 0,05$

Т а б л и ц а 3

Содержание хлорофиллов *a*, *b*, *a+b*, каротиноидов и уровень ССК в проростках пшеницы исследованных сортов в зависимости от дозы γ -облучения зерновок

Доза γ -облучения, Гр	Содержание, мкг/г _{сух.тк.}				ССК, %
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	каротиноиды	
«Якутянка-224»					
0	162,0±8,1	54,0±2,7	216,0±10,8	66,0±3,3	55,0±2,8
10	327,0±16,4	178,0±8,9	505,0±25,3	75,0±3,8	77,5±3,9
200	15,0±0,8	6,0±0,3	21,0±1,1	9,0±0,5	62,9±3,1
600	16,0±0,8	7,0±0,4	23,0±1,2	9,0±0,5	66,9±3,4
«Гуймаада»					
0	293,0±14,7	121,0±6,1	414,0±20,7	89,0±4,5	64,3±3,2
10	321,0±16,1	142,0±7,1	463,0±23,2	81,0±4,1	67,5±3,4
100	26,0±1,3	9,0±0,5	35,0±1,8	14,0±0,7	56,6±2,8
600	24,0±1,2	9,0±0,5	33,0±1,7	12,0±0,6	60,0±3,0
«Приленская-19»					
0	206,0±10,3	86,0±4,3	292,0±14,6	67,0±3,4	64,8±3,2
10	328,0±16,4	184,0±9,2	512,0±25,6	77,0±3,9	79,1±3,9
200	12,0±0,6	6,0±0,3	18,0±0,9	8,0±0,4	73,3±3,7
600	15,0±0,8	7,0±0,4	22,0±1,1	9,0±0,5	70,0±3,5

$p < 0,05$

Следующей частью исследования было выявление совместного действия лиофилизата и остро-го предпосевного γ -облучения зерновок пшеницы на фотосинтетические характеристики проростков. На рис.1–3 представлены изменения уровня ССК в зависимости от концентрации лиофилизата и дозы предпосевного γ -облучения зерновок трех сортов пшеницы.

Выявлено, что лиофилизированный экстракт из *A. retroflexus* L. способствует немонотонному увеличению уровня ССК в проростках пшеницы сорта «Якутянка-224», зерновки которых не подвергались предпосевному γ -облучению. Наблюдалось статистически достоверное увеличение этого показателя только при 2 %-й концентрации водного раствора лиофилизата (рис. 1, а). Действие лиофилизата на фотосинтез проростков, выросших из γ -облучённых зерновок дозой 10 Гр, проявилось в увеличении на 15,4 % уровня ССК (вариант 2 %), а вариант с предпосевным замачиванием облучённых зерновок 1 %-м раствором лиофилизата привел к снижению на 64 % уровня ССК (рис. 1, б). Уровень ССК в проростках пшеницы, выросших из зерновок, получивших дозы облучения 200 и 600 Гр и обработанных всеми вариантами лиофилизата, статистически достоверно не отличался от контрольного значения (рис. 1, в, г).

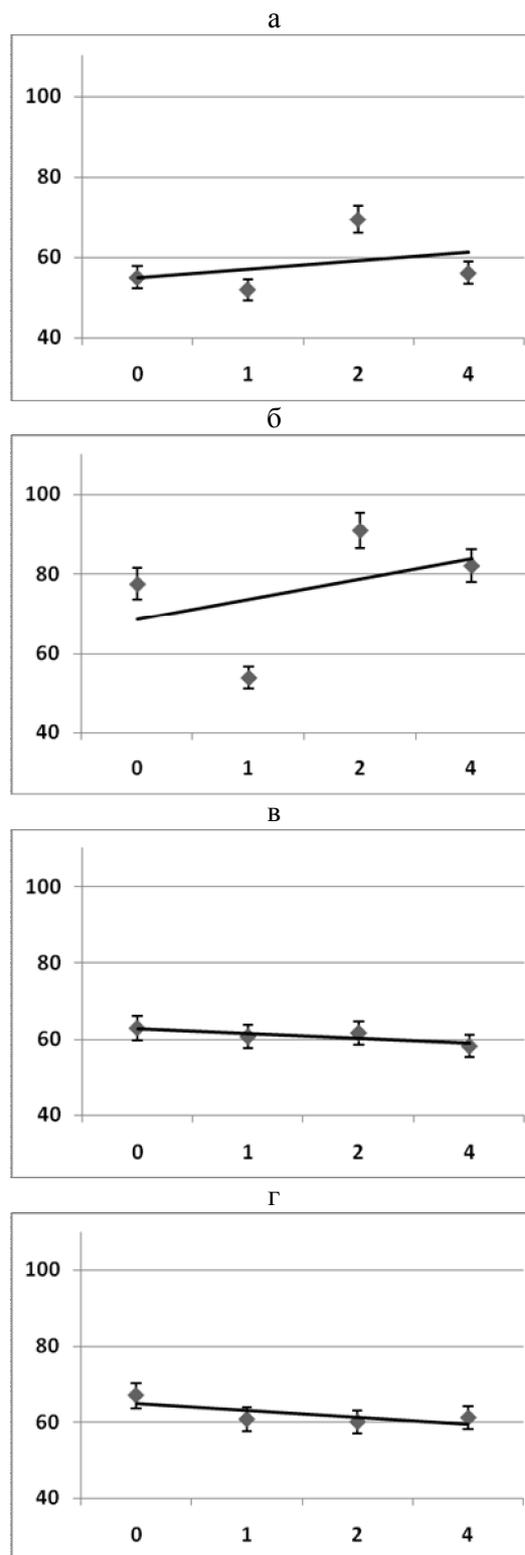


Рис.1. Изменения ССК в зависимости от концентрации лиофилизата при предпосевном γ -облучении, сорт «Якутянка-224»: По оси абсцисс – концентрация лиофилизата, %; по оси ординат – ССК, %
а – 0 Гр; б – 10 Гр; в – 200 Гр; г – 600 Гр

Предпосевное замачивание зерновок (не облученных) пшеницы сорта «Туймаада» разными концентрациями лиофилизата снизило уровень ССК в проростках. Значительное снижение (в 3,4 раза) ССК было зафиксировано в варианте с замачиванием 4 % (рис. 2, а). Острое γ -облучение дозой 10 Гр в сочетании с замачиванием зерновок в 2 %-й и 4 %-й концентрациях лиофилизата из экстракта *A. retroflexus* L. привело к увеличению на 30 % уровня ССК в проростках этого сорта. Статистически достоверное снижение на 30 % уровня ССК зафиксировано при замачивании зерновок 1 %-й концентрацией лиофилизата (рис. 2, б). Облучение зерновок дозой 100 Гр и предпосевное замачивание их всеми концентрациями лиофилизата статистически достоверных изменений уровней ССК не было зафиксировано (рис. 2, в). Выявлена небольшая тенденция к увеличению (варианты 1 и 4 %) уровня ССК в проростках при замачивании лиофилизатом зерновок и облученных дозой 600 Гр (рис. 2, г).

При замачивании в 2 %-м лиофилизате зерновок пшеницы сорта «Приленская-19», не подвергнутых предпосевному γ -облучению, уровень ССК статистически достоверно увеличился на 18 % в клетках проростков (рис. 3, а). Сочетание пострадиационного замачивания зерновок (варианты 2 и 4 %) и острого γ -облучения дозой 10 Гр привело к увеличению уровня ССК в клетках проростков на 28 % (рис. 3, б). Тогда как в вариантах с облучением 200 и 600 Гр и замачиванием во всех концентрациях лиофилизата произошло уменьшение уровня ССК на 16–20% (рис. 3, г).

Таким образом, влияние предпосевной обработки зерновок пшеницы различными концентрациями раствора лиофилизата *A. retroflexus* на проростки исследованных сортов пшеницы было неодинаковым, имело сортоспецифичную направленность и не оказывало выраженного негативного воздействия на физиологические характеристики. Наибольшее воздействие на проростки пшеницы при замачивании зерновок оказывал 2 %-й водный раствор лиофилизата, действие которого заключалось в увеличении количества изученных пигментов в проростках и в изменении уровня ССК в фотосистемах.

Сочетание острого γ -облучения зерновок дозой 10 Гр и предпосевное замачивание в 2 %-м лиофилизате экстракта вегетативных частей щирницы запрокинутой выявило увеличение количества изученных фотосинтетических пигментов, уровня ССК, что позволяет говорить о радиопротекторном действии лиофилизата. При той же дозе облучения, но при использовании лиофилизата в концентрации 1 % у проростков

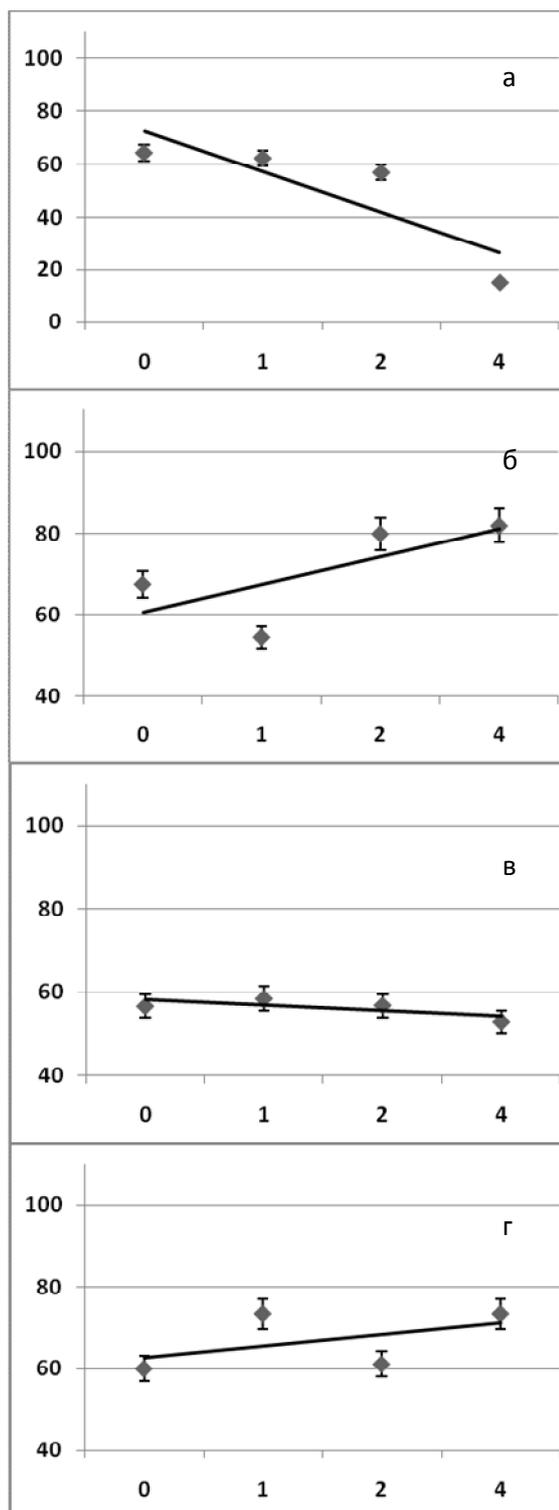


Рис.2. Изменения ССК в зависимости от концентрации лиофилизата при предпосевном γ -облучении, сорт «Туймаада». Условные обозначения те же, что и на рис. 1

отмечено снижение показателей большинства изученных параметров, т.е. такое сочетание лиофилизата и дозы облучения вызвало радиосенсибилизирующий эффект.

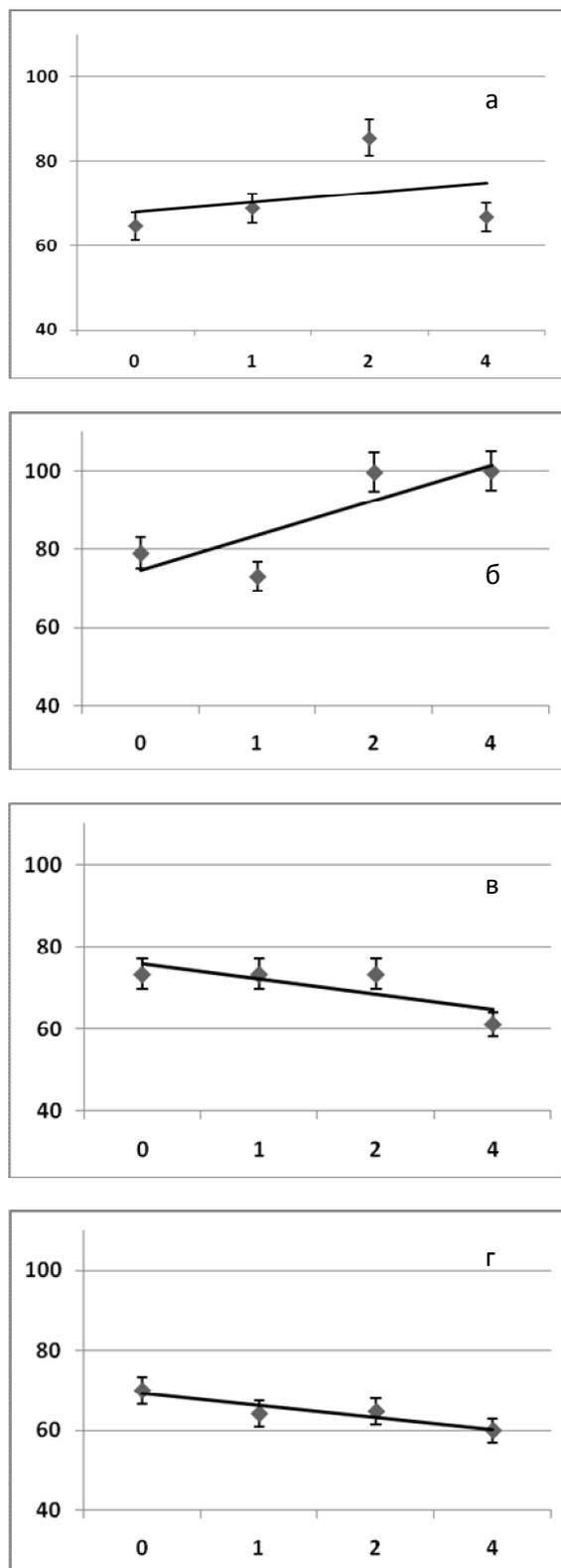


Рис.3. Изменения ССК в зависимости от концентрации лиофилизата при предпосевном γ -облучении, сорт «Приленская-19». Условные обозначения те же, что и на рис. 1

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту №0376-2014-0005. Тема 56.1.5. «Физиолого-биохимические механизмы формирования адаптивного потенциала, устойчивости и продуктивности растительных компонентов экосистем Южной и Центральной Якутии». Направление 56. «Физиология и биохимия растений, фотосинтез, взаимодействие растений с другими организмами» программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

Литература

1. Филиппович И.В. Феномен адаптивного ответа клеток в радиобиологии // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1991. – Т.31. – С. 803–813.
2. Тишкевич Т.К., Петрович И.С., Заболотный А.И. Изменение физиолого-биохимических характеристик растений люпина под влиянием инкорпорированных радионуклидов // Биология. –1993. –Т. 33. – С. 54–57.
3. Stobart A. K., Griffith W. T., Ammen-Bukhari I., Sherwood R. P. The effect of Cd^{2+} on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley // *Physiol.plant. USA.* –1985. – V. 63. – P.293–298.
4. Васильченко А.И. *Amaranthus retroflexus* L. Щирица запрокинутая // Флора СССР. – 1936. – Т. VI. – С. 362–363.
5. Кислова Н.М. Полезные свойства сорняков. – М.: АСТ-ПРЕСС, 2009. – 288 с.
6. Воронов И.В., Журавская А.Н., Поскачина, Е.Р. Радиомодифицирующее действие лиофилизата *Amaranthus retroflexus* // Материалы Межд. междисциплинар. научн. конф. «Биологически активные вещества: фундаментальные и прикладные вопросы получения и применения». – Новый Свет, Крым, Украина. –2013. – Т. 1. – С. 247.
7. Каталог районированных (включенных в Госреестр) сортов сельскохозяйственных культур, созданных учеными Сибири в 1929–1995. – Новосибирск, 1997. – 350 с.
8. Гинс М.С. Биологически активные вещества амаранта. Амарантин: свойства, механизмы действия и практическое использование. – М.: РУДН, 2002. – 183 с.
9. Клейн Р.М., Клейн Д.Т. Методы исследования растений. – М.: Колос, 1974. – 528 с.
10. Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. Практикум по физиологии растений. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
11. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids Pigments of Photosynthetic Biomembranes // *Method. Enzymol.* – 1987. – V. 148. – P. 350–382.
12. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1980. –293 с.

13. Веселов А.П., Курганова Л.Н., Балалаева И.В. Роль REDOX-статуса в регуляции активности глутатионзависимых антиоксидантных ферментов хлоропластов при воздействии экзогенного H₂O₂ // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 1. – С.119–120.
14. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. – Киев: Наукова думка, 1989. – 380 с.
15. Удовенко Г. В., Гончарова Э. А. Влияние экстремальных условий среды на структуру урожая сельскохозяйственных растений // Методические указания. –М.: Гидрометеоздат, 1982. – 144 с.
16. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. – М.: Мир, 1986. – Т.2. – 312 с.
17. Физиология растений: Учебник для студентов вузов / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балнокин, В.Ф. Гавриленко и др.; под ред. И.П. Ермакова. – М.: Академия, 2005. – 640 с.
18. Холл Д., Рао К. Фотосинтез. – М.: Мир, 1983. – 134 с.
19. Патент 2140432 РФ, МПК С09К15/00. Составы, содержащие антиоксиданты; составы, замедляющие химические реакции / В.К. Гинс, П.Ф. Кононков, В.Ф. Пивоваров и др. Опубл. 27.10.1999.

Поступила в редакцию 28.04.2015

УДК 57.084:537.8

Эффекты действия техногенных электромагнитных излучений и полей на живые организмы (обзор)

М.М. Шашурин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Обзор посвящен вопросам изучения влияния электромагнитных волн и полей на биообъекты. Описаны основные источники техногенного электромагнитного загрязнения – это системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, функциональные передатчики, так же приведены их физические характеристики. Приведены примеры ответных реакций организмов на воздействие электромагнитных полей и излучений. Описаны основные принципы методологического подхода к исследованиям взаимодействия живых организмов и электромагнитных воздействий. Проанализированы различные гипотезы о механизмах взаимодействия электромагнитных полей и излучений с микроорганизмами, насекомыми, растениями и млекопитающими. Показано, что изучение влияния электромагнитных полей и излучений на биологические объекты позволяет получать важные научные данные, которые могут быть применены на практике, в экологии – для разработки предельно допустимых уровней ЭМП для человека и других биообъектов, в медицине – при разработке новых способов диагностики и методов физиотерапевтического лечения болезней, биотехнологии – как один из способов регулирования биохимических показателей различных микробных культур.

Ключевые слова: живые организмы, электромагнитное поле, магнитотропизм, магниторецепция.

The review is devoted to problems of studying of electromagnetic waves and fields influence on biological objects. Main sources of technogenic electromagnetic pollution and their physical characteristics are listed. Examples of organisms' responses to influence of electromagnetic fields and radiations are given. The basic principles of methodological approach to studies of living organisms and electromagnetic influences interaction are described. The analysis of hypotheses describing mechanisms of interaction of electromagnetic fields and waves with biological objects is carried out. It is shown that studying of influence of electromagnetic fields and radiations on biological objects allows to obtain important scientific data which can be put into practice, in ecology – for development of the EMP marginal levels for a human being and other biological objects, in medicine - for development of new ways of diagnostics and methods of physiotherapeutic treatment of diseases, in biotechnology – as one of ways of regulation of biochemical indexes of various microbial cultures.

Key words: living organisms, electromagnetic field, magnetotropism, magnetoreception.

13. Веселов А.П., Курганова Л.Н., Балалаева И.В. Роль REDOX-статуса в регуляции активности глутатионзависимых антиоксидантных ферментов хлоропластов при воздействии экзогенного H₂O₂ // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 1. – С.119–120.
14. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. – Киев: Наукова думка, 1989. – 380 с.
15. Удовенко Г. В., Гончарова Э. А. Влияние экстремальных условий среды на структуру урожая сельскохозяйственных растений // Методические указания. –М.: Гидрометеоиздат, 1982. – 144 с.
16. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. – М.: Мир, 1986. – Т.2. – 312 с.
17. Физиология растений: Учебник для студентов вузов / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балнокин, В.Ф. Гавриленко и др.; под ред. И.П. Ермакова. – М.: Академия, 2005. – 640 с.
18. Холл Д., Рао К. Фотосинтез. – М.: Мир, 1983. – 134 с.
19. Патент 2140432 РФ, МПК С09К15/00. Составы, содержащие антиоксиданты; составы, замедляющие химические реакции / В.К. Гинс, П.Ф. Кононков, В.Ф. Пивоваров и др. Опубл. 27.10.1999.

Поступила в редакцию 28.04.2015

УДК 57.084:537.8

Эффекты действия техногенных электромагнитных излучений и полей на живые организмы (обзор)

М.М. Шашурин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Обзор посвящен вопросам изучения влияния электромагнитных волн и полей на биообъекты. Описаны основные источники техногенного электромагнитного загрязнения – это системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, функциональные передатчики, так же приведены их физические характеристики. Приведены примеры ответных реакций организмов на воздействие электромагнитных полей и излучений. Описаны основные принципы методологического подхода к исследованиям взаимодействия живых организмов и электромагнитных воздействий. Проанализированы различные гипотезы о механизмах взаимодействия электромагнитных полей и излучений с микроорганизмами, насекомыми, растениями и млекопитающими. Показано, что изучение влияния электромагнитных полей и излучений на биологические объекты позволяет получать важные научные данные, которые могут быть применены на практике, в экологии – для разработки предельно допустимых уровней ЭМП для человека и других биообъектов, в медицине – при разработке новых способов диагностики и методов физиотерапевтического лечения болезней, биотехнологии – как один из способов регулирования биохимических показателей различных микробных культур.

Ключевые слова: живые организмы, электромагнитное поле, магнитотропизм, магниторецепция.

The review is devoted to problems of studying of electromagnetic waves and fields influence on biological objects. Main sources of technogenic electromagnetic pollution and their physical characteristics are listed. Examples of organisms' responses to influence of electromagnetic fields and radiations are given. The basic principles of methodological approach to studies of living organisms and electromagnetic influences interaction are described. The analysis of hypotheses describing mechanisms of interaction of electromagnetic fields and waves with biological objects is carried out. It is shown that studying of influence of electromagnetic fields and radiations on biological objects allows to obtain important scientific data which can be put into practice, in ecology – for development of the EMP marginal levels for a human being and other biological objects, in medicine - for development of new ways of diagnostics and methods of physiotherapeutic treatment of diseases, in biotechnology – as one of ways of regulation of biochemical indexes of various microbial cultures.

Key words: living organisms, electromagnetic field, magnetotropism, magnetoreception.

Эволюция всего живого на нашей планете протекает под непрерывным воздействием магнитных, электрических полей, электромагнитных излучений природного происхождения, таких как магнитное поле Земли, электростатическое поле атмосферы, космическое и солнечное излучение. Поэтому в процессе эволюции у живых организмов выработались различные стратегии взаимодействия с естественным электромагнитным фоном Земли. Например, у многих растений сформировалось свойство магнитотропизма (изгибание стебля или корня в процессе роста под действием постоянного магнитного поля) [1]. Также существуют системы пространственной ориентации по магнитному полю Земли у птиц, но физический механизм компасной магниторецепции пока не выяснен [2].

На современном этапе развития цивилизации основным, производимым и потребляемым источником энергии является электричество. За последние 100 лет производство и потребление электроэнергии в мире увеличилось более чем в 1500 раз. Любое использование или даже просто передача электроэнергии по проводам индуцирует возникновение искусственных электрических, магнитных, электромагнитных полей и излучений различных частот и мощностей [3]. Так как искусственные электромагнитные поля обладают на много большими интенсивностями и отличным от естественных частотным диапазоном, они могут изменять различные характеристики живых организмов, адаптированных только к природным электромагнитным полям (ЭМП).

Основными источниками техногенного электромагнитного загрязнения (смога) являются:

- системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии постоянного и переменного токов (0–3 кГц): электростанции, линии электропередач, трансформаторные подстанции, системы электроснабжения, бытовые приборы;

- транспорт на электроприводе (0–3 кГц): железнодорожный транспорт и его инфраструктура, городской транспорт – метрополитен, троллейбусы, трамваи и т. п. – является относительно мощным источником магнитного поля в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. Максимальные значения плотности потока магнитной индукции «В» в пригородных электричках достигают 75 мкТл при среднем значении 20 мкТл;

- функциональные передатчики: радиовещательные станции низких (30–300 кГц), средних (0,3–3 МГц), высоких (3–30 МГц) и сверхвысоких (30–300 МГц) частот; телевизионные передатчики; базовые станции систем подвижной (в т.ч. сотовой) радиосвязи; наземные станции

космической связи; радиорелейные станции; радиолокационные станции и т. п. [4].

Гигиеническая оценка уровней ЭМП от всех типов радиостанций сухопутной подвижной связи (включая ручные радиотелефоны, абонентские терминалы спутниковой связи) осуществляется при частотах меньше 300 МГц – по значениям напряженности электрического поля «Е» (В/м), при $300 < \text{частота} < 2400$ МГц – по значениям плотности потока энергии (мВт/см² или мкВт/см²) [5].

Влияние электромагнитных полей и излучений на различные характеристики живых организмов может проявляться на различных уровнях их организации: от биохимического до поведенческих реакций животных. Например, воздействие слабых магнитных полей на проростки гороха вызывало изменение уровня перекисного окисления липидов и содержания аскорбиновой кислоты в хлоропластах [6].

Было показано, что действие ЭМП промышленной частоты (50 Гц) приводит к изменениям физиолого-биохимических и цитологических характеристик проростков семян *P. media*, в том числе суммарного содержания зеленых пигментов (Хл. a+b) и каротиноидов в тканях проростков *P. Media* [7]. Установлено, что с увеличением значений напряженности электрического и индукции магнитного поля наблюдалось снижение всхожести семян, показателя митотической активности клеток корневой меристемы и интенсивности молекулярно-генетических процессов в тканях проростков [7].

Хроническое воздействие переменного электрического поля, с частотой 8 Гц и напряженностью 0,7 В/м, на самок кроликов в период течки и беременности приводит к дегенеративным изменениям фолликулов и снижению рождаемости [8]. Исследования поведения пчел в зоне влияния ЛЭП показали увеличение их агрессивности и беспокойства, снижения работоспособности, склонности к роению, потере маток [9].

Относительно влияния электромагнитных полей и излучений на организм человека существует множество публикаций, описывающих как положительные, так и отрицательные стороны влияния на здоровье. Из негативных последствий воздействия ЭМП – быстрая утомляемость, повышенная возбудимость и другие нарушения по типу астенического синдрома [10, 11]. Исследования, проведенные И.В. Зюзиной, показали, что хроническое воздействие электромагнитных излучений судовых радиолокационных станций повышает заболеваемость онкологическими, различными иммунными патологиями, сердечно-сосудистой системы среди работников [12].

Кроме отрицательных сторон воздействия электромагнитных полей на организм человека имеются и положительные эффекты. Например, в медицинской практике широко и с успехом применяются методы электромагнитной терапии, такие как электролечение, основанное на воздействии на организм большого ультравысокочастотного электромагнитного поля. Магнитотерапия – сравнительно новое направление физиотерапии, основанное на воздействии переменного магнитного поля низкой частоты на весь организм или его часть. Ткани организма под влиянием магнитного поля не намагничиваются, однако многим составным элементам тканей (например, воде, форменным элементам крови) могут передаваться магнитные свойства. Данный метод действует на субмолекулярном, молекулярном и субклеточном уровнях [13]. Очень чувствительна к магнитному полю сердечно-сосудистая система и при лечении заболеваний сердца улучшается коронарное кровообращение, снижается потребность миокарда в кислороде, повышается устойчивость организма к физической нагрузке. При воздействии на сосуды достигается их расширение, снижается вязкость крови и способность тромбоцитов образовывать тромбы в сосудах, улучшается местное кровообращение, доставка к тканям и органам кислорода. Таким образом, магнитные поля оказывают противовоспалительное, противоотечное, седативное, болеутоляющее действия. Основные эффекты воздействия магнитных полей на животные организмы известны: 1) усиление кровотока и улучшение кислородтранспортной функции крови [14, 15]; 2) изменение скорости миграции ионов кальция [16]; 3) изменение кислотно-щелочного баланса (рН) различных жидкостей в теле человека и животных [15]; 4) изменение выработки (чаще повышение) гормонов эндокринными железами [17]; 5) изменение ферментной активности и скоростей различных биохимических процессов [18, 19]; 6) снижение вязкости крови [20].

Электромагнитные поля оказывают влияния и на растения. Кроме упомянутого выше магнитотропизма, внешние магнитные поля могут задавать различные биоритмы и изменять ритмы функционально-динамических процессов в растениях [21]. Также было показано, что переменное магнитное поле с индукцией 25 мТл в диапазоне частот 1–12 Гц оказывает стимулирующий эффект на митотическую активность апикальных корневых и стеблевых меристем одно- и двудольных растений [22]. Имеются данные о стимулирующем влиянии коротких электромагнитных волн на рост и развитие проростков томатов и на увеличение продуктивности и сроков их плодоношения [23].

Некоторыми авторами были выявлены стимулирующие эффекты коротковолнового излучения на примере дрожжей [24, 25].

И все же, если говорить об электромагнитном загрязнении (незапланированном, техногенном насыщении среды обитания различными видами электромагнитных полей и излучений), то чаще всего целесообразно определять данное воздействие как негативное, так как оно выводит из естественного гомеостаза не только отдельные организмы, но и целые экосистемы. Например, воздействие электромагнитных полей даже нетеплового уровня, отличающегося от параметров естественного фона, вызывает обратимые изменения регуляции физиологических процессов: у животных – изменение интенсивности обменных процессов, иммунной активности и т.п.; у растений – изменения процессов роста, газообмена, поглощения минеральных веществ и т.п. Под влиянием ЭМП изменяется и поведение животных – их двигательная активность, ориентация в пространстве, способность к выработке условных рефлексов [26].

На сегодняшний день ни в одной стране мира не разработаны предельно допустимые уровни (ПДУ) для оценки воздействия электромагнитных полей и излучений на окружающую среду. Единственным объектом, для которого созданы и внедрены ПДУ и Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы – это человек. В Российской Федерации воздействие электромагнитных полей на человека регламентируется СанПиН № 2.2.4.1191-03.

Методология проведения исследований

Вышесказанное позволяет заключить, что изучать действие электромагнитных полей и излучений можно на любых биологических объектах. Вместе с тем для правильной постановки цели и задач исследований требуется конкретизировать выбор биообъектов и исследуемых их свойств, а также параметров действующего поля или излучения. С методологической точки зрения в работах, посвященных воздействию электромагнитных полей и излучений на биообъекты, выделено три уровня исследований:

1. Феноменологический, когда за основу берется любая комбинация триады стимул–объект–реакция и основной целью является обнаружение некоего эффекта, связанного с наличием или отсутствием случайно взятого внешнего электромагнитного воздействия. Это начальный этап исследований, доказывающий наличие проблемы.

2. Биофизический уровень исследований заключается в попытке объяснить наблюдаемые биологические эффекты с точки зрения совре-

менных физико-химико-биологических представлений. Данный тип исследований может быть применен только в частных вопросах, когда между механизмом и внешней реакцией объекта устанавливается причинно-следственное соответствие.

3. Кибернетический тип исследований является промежуточным между феноменологическим и биофизическим. За основу берется кибернетическое определение системы как «черного ящика» и по изменению входных и выходных параметров делается попытка его «просветления». Этот тип исследований представляется наиболее перспективным. Основу его составляют тщательно продуманные системы выбора экспериментальной триады стимул – объект – реакция и переход от одной комбинации к другой [27].

Механизмы действия ЭМП

Несмотря на то, что проведено и проводится огромное количество исследований по воздействию электромагнитных полей и излучений на биообъекты, природа выявленных эффектов до сих пор до конца не выявлена.

Существуют несколько гипотез о механизмах действия электромагнитных полей на биологические объекты:

1. Гипотеза биогенного магнетита заключается в том, что в теле некоторых животных и микроорганизмов естественным путем образуются микроскопические кристаллы, обычно магнетита, способные намагничиваться. Во внешнем магнитном поле такие кристаллы испытывают вращательный момент и оказывают давление на близлежащие ткани, что и вызывает биологическую реакцию [28]. По-видимому, эта идея способна объяснить некоторые магнитобиологические эффекты, но у многих живых организмов в клетках отсутствует биогенный магнетит, а эффекты от воздействия магнитного поля присутствуют. Ориентационные эффекты могут возникать также и на молекулярном уровне, как проявление диа- и парамагнетизма. Однако эти эффекты становятся существенными только в достаточно сильных МП, порядка 1 Тл и выше.

2. Идея о том, что действующим фактором при облучении биологических систем низкочастотным МП являются вихревые электрические токи, индуцируемые переменным МП в биологических тканях. Они могут приводить к нагреву ткани, а также смещать стационарное равновесие электрохимических реакций, если их плотность превышает плотность естественных биотоков $\sim 1 \text{ мА/м}^2$. Интенсивность токов определяется напряженностью индуцированного электрического поля, которая пропорциональна

произведению амплитуды и частоты магнитного поля. Если данная гипотеза верна, то магнитобиологический эффект в эксперименте должен коррелировать с изменениями этой величины. Действительно, имеются экспериментальные свидетельства того, что с ростом напряженности переменного МП появляется такая корреляция. Однако корреляций в случае относительно слабых МП, порядка геомагнитного, в нескольких независимых исследованиях обнаружено не было. Это указывает на существование первичных механизмов магнитобиологических эффектов, не связанных с вихревыми токами [29].

3. В микроволновом диапазоне биологические эффекты могут быть объяснены тем, что области воды, окружающие биологически важные ионы или сложные биофизические структуры, имеют разную комплексную диэлектрическую проницаемость [30, 31].

4. Также существует мнение о том, что электромагнитные воздействия обладают сигнальным (информационным) характером действия на биологические системы. Сигнальный эффект объясняется тем, что биосистема находится в состоянии, близком к режиму неустойчивого динамического равновесия, поэтому надо лишь подтолкнуть систему и она перейдет в другое состояние за счет внутренних ресурсов. Другими словами, произойдет так называемое биологическое усиление слабого сигнала магнитного поля [32, 33].

5. Энергия тепловых флуктуаций химических процессов в живых организмах на десять порядков выше, чем энергия кванта магнитного поля, что вызывает закономерный вопрос, почему при таких разностях энергий проявляется магнитобиологический эффект? Решение связывают с идеей когерентного воздействия внешнего фактора на фоне некогерентного теплового шума, которое позволяет раскачать какую-либо систему до состояния, в котором его энергия будет достаточна для инициирования акта химической реакции, либо изменить синхронную систему так, что высвободится квант энергии коллективного возбуждения [34].

6. Другая гипотеза заключается в том, что не энергия, а какие-то другие параметры системы, например, поляризация колебаний, приобретают под действием МП свойства, не безразличные для работы связанных с ним биофизических систем. Существует модель, согласно которой, колебания ионов при действии магнитных полей оказывают влияние на конформацию некоторых белков [35].

7. В ряде случаев эффекты слабых МП имеют резонансный характер, причем эффективные частоты близки к циклотронным частотам ио-

нов Ca^{+2} , Na^{+} и др. [36]. Резонансный характер биологических эффектов электромагнитных полей наблюдаются в разных частотных диапазонах. Для объяснения этих эффектов рассматривают несколько возможных механизмов, включая изменение конформации белков вследствие индуцированного ЭМП, изменения степени гидратации некоторых молекул [37].

8. Многие авторы связывают биологическое действие МП с измененными состояниями воды, которые возникают при действии внешних полей на воду. Далее эти перестройки кластеров воды передаются на биологический уровень за счет участия воды в разнообразных метаболических реакциях. В настоящее время остается неясным, что именно в жидкой воде могло бы быть мишенью действия магнитных полей. Вместе с тем есть основание полагать, что эффект действия электромагнитных полей проявляется за счет наличия относительно устойчивых водно-молекулярных ассоциатов, обладающих поляризованными доменами, определяющими свойство памяти на электромагнитное воздействие [38]. Устойчивые структурные изменения в воде наблюдали по спектрам люминесценции и связывали с наличием в воде дефектов разного типа с характерными центрами излучения [39]. Некоторыми авторами предложена модель, в которой жидкая вода представлена как «вязаная» структура из линейных молекулярных ассоциатов или лент, составленных из около 20 ориентированных молекул воды. Состояние такой системы описывается в рамках вращательных солитонных возбуждений, распространяющихся вдоль лент и взаимодействующих с возбуждениями на соседних лентах и с внешним ЭМП [40]. Общеизвестная точка зрения на природу носителей памяти в жидкой воде и их взаимодействие с электромагнитными полями пока отсутствует.

Заключение

Изучение влияния электромагнитных полей и излучений на биологические объекты позволяет получать важные научные данные, которые могут быть применены на практике, в экологии – для разработки предельно допустимых уровней ЭМП для человека и других биообъектов, медицине – при разработке новых способов диагностики и методов физиотерапевтического лечения болезней, биотехнологии – как один из способов регулирования биохимических показателей различных микробных культур. Кроме того, выявление механизмов воздействия электромагнитных полей и излучений позволит перейти на новую фундаментальную ступень понимания взаимодействия живой и неживой природы.

Литература

1. Крылов А.В., Тараканова Г.А. Явление магнитотропизма у растений и его природа // Физиология растений. – 1960. – Т.7, №2, –С. 191.
2. Кавокин К.В., Чернецов Н.С., Пахомов А.Ф. и др. Нарушение работы магнитного компаса садовой славки (*Sylvia borin*) слабым переменным магнитным полем // Ориентации и навигации животных: Тезисы научн. конф. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 60 с.
3. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н. и др. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие для вузов / Под ред. Л.А. Муравья. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 447 с.
4. Дубров А.П. Геомагнитное поле и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 175 с.
5. Гигиеническая оценка электромагнитных полей, создаваемых радиостанциями сухопутной подвижной связи, включая абонентские терминалы спутниковой связи // Методы контроля. Физические факторы. МУК 4.3.1676-03 Минздрав России. – М., 2003.
6. Половинкина Е.О., Кальясова Е.А., Синицына Ю.В., Веселов А.П., Изменение уровня перекисного окисления липидов и активности компонентов антиоксидантного комплекса в хлоропластах гороха при воздействии слабых импульсных магнитных полей // Физиология растений. – 2011. – Т. 58, № 6. – С. 930–934.
7. Shashurin M. M., Prokopiev I. A., Shein A. A. et al. Physiological responses of *Plantago media* to electromagnetic field of power-line frequency (50 Hz) // Russian Journal of Plant Physiology. July 2014. – Vol. 61 Issue 4. – P. 484–488.
8. Бродовская З.И., Королева В.А., Нелюбина Э.Г. Влияние слабых электромагнитных полей (ЭМП) на некоторые показатели метаболизма лейкоцитов и воспроизводительную функцию самок млекопитающих // Влияние электромагнитных полей на биологические объекты. – Харьков: Харьковский мед. институт, 1973. – Т.53. – С.25–30.
9. Плеханов Г.Ф. Основные закономерности низкочастотной электромагнитобиологии / Под ред. А.Г. Карташева. – Томск, 1990. – 186 с.
10. Вялов А.М. Клинико-гигиенические и экспериментальные данные о действии магнитных полей в условиях производства // Влияние магнитных полей на биологические объекты. – М.: Наука, 1971. – С.165
11. Асанова Т.П., Раков А.Н. Состояние здоровья работающих в электрическом поле открытых распределительных устройств 400–500 кВ // Гигиена труда и профзаболеваний. – 1966. – № 5. – С. 50–52.

12. *Зюзина И.В.* Отдаленные последствия хронического облучения людей электромагнитными полями сверхвысоких частот судовых радиолокационных станций: Автореф. дис. ... к.б.н.: 03.00.16. – Находка, 2009. – 23 с.
13. *Пономаренко Т.Н.* Электромагнитотерапия и светолечение. – СПб.: Мир и семья, 1995. – 248 с.
14. *Чураков А.В.* Лечение тяжелой черепно-мозговой травмы с использованием комбинированной экстракорпоральной аутогемомангнитотерапии: Автореф. дис. ... к.м.н.: 14.00.37, 14.00.28. – Минск, 2009. – 23 с.
15. *Якубцевич Р.Э., Спас В.В., Плетнев С.В.* Использование магнитных полей в реаниматологии и интенсивной терапии // Медицинские новости. – 2003. – № 3. – С. 72–74.
16. *Багель Е.Г.* Основные аспекты механизма действия физических факторов при использовании их в спортивной медицине // Материалы Межд. сателлитного симпозиума «Физические факторы в повышении работоспособности, лечении и реабилитации легкоатлетов». – Минск, 2001. – С. 9–13.
17. *Остапенко В.А. и др.* Биологическое действие магнитных полей // Эфферентная терапия. – 2004. – Т. 10, № 4. – С. 21–23.
18. *Byus C.V., Pieper S.E., Adey W.R.* The effects of low-energy 60-Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis*. 1987. Oct;8(10):1385–1389.
19. *Litovitz T., Krause D., Penafiel M. et al.* The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity // *Bioelectromagnetics*. – 1993. – № 14. – P. 395–404.
20. *Теплякова А.И., Тепляков Н.Г., Кручинский В.А., Остапенко Д.В.* Ишемическая болезнь мозга в условиях низкоуровневого радиационного воздействия: некоторые гематологические аспекты. Сообщение 2. Особенности состояния эритронов и реологических свойств крови // Эфферентная терапия. – 2000. – № 1. – С. 32–35.
21. *Мизун Ю. В., Мизун Ю. Г.* Тайны будущего. – М.: Вече, 2000. – 592 с.
22. *Беляченко Ю.А., Усанов А.Д., Тырнов В.С., Усанов Д.А.* Угасание эффекта стимуляции митотической активности меристем при увеличении сроков хранения сухих семян после экспозиции в низкочастотном магнитном поле // Бюл. Бот. сада Саратовского ун-та. – 2010. – Вып. 9. – С. 135–138.
23. *Насурлаева З.Ю.* Влияние искусственного электромагнитного поля на рассаду // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 2. – С. 7–11.
24. *Голант М.Б., Кузнецов А.П., Божанова Т.П.* О механизме синхронизации культуры дрожжевых клеток КВЧ-излучением // Биофизика. – 1994. – Т. 39, вып. 3. – С. 490–495.
25. *Гамаюрова А.Ю., Крыницкая М.Н., Астраханцева М.Н.* Влияние ЭМИ КВЧ нетепловой интенсивности на рост дрожжей *saccharomyces cerevisiae* // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – № 1. – С. 117–120.
26. *Григорьев О.А., Бичелдей Е.П., Меркулов А.В. и др.* Определение подходов к нормированию воздействия антропогенного электромагнитного поля на природные экосистемы // URL http://www.tesla.ru/publications/index.php?subaction=showfull&id=1117384010&archive=&start_from=&ucat=6&.
27. *Плеханов Г.Ф.* Основные закономерности низкочастотной электромагнитобиологии / Под ред. А.Г. Карташева. – Томск. изд. Томского ун-та, 1990. – 187 с.
28. *Киривинк Дж., Джонс Д., Мак-Фадден Б.* Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биомагнетизме. – М.: Мир, 1989. – 353 с.
29. *Рыбаков Ю.Л., Седакова А.А., Николаева Т.Г. и др.* Изучение противоопухолевого действия вихревого магнитного поля (ВМП) в экспериментальных тест-системах *in vitro* и *in vivo* // Медицинская физика. – 2003. – № 3. – С. 42–50.
30. *Ильина С.А., Бакаушина Г.Ф., Гайдук В.И. и др.* О возможной роли воды в передаче воздействия излучения миллиметрового диапазона на биологические объекты // Биофизика. – 1979. – Т. 24, № 3. – С. 513–518.
31. *Лященко А.К., Родитат И.В., Новскова Т.А.* Водная система клетки как объект слабого воздействия // Избранные труды Межд. конгресса «Слабые и сверхслабые излучения в биологии и медицине». – СПб., 01–04 июля 2003. – С. 3–13.
32. *Плюсина Т.Ю., Ризниченко Г.Ю., Аксенов С.И., Черняков Г.М.* Влияние слабого электрического воздействия на триггерную систему трансмембранного ионного переноса // Биофизика. – 1994. – Т. 39, № 2. – С. 345–350.
33. *Гапеев А.Б., Сафронова В.Г., Чемерис Н.К., Фесенко Е.Е.* Модификация активности перитонеальных нейтрофилов мыши при воздействии миллиметровых волн в ближней и дальней зонах излучения // Биофизика. – 1997. – Т. 42, № 2. – С. 1125–1134.
34. *Frohlich H.* Long-range coherence and energy storage in biological systems *Int // J. Quantum Chem.* – 1968. – 2. – P. 641–649.
35. *Бинги В.Н.* Физические механизмы магнитобиологических явлений: Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 48 с.

36. Kordyum E., Bogatina N. Cyclotron-based effects on plant gravitropism M. Sobol [et al.] // Journal of Advances in Space Reseach. – 2007. – V. 39, №7. – P. 1210–1218.

37. Беижий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 4.

38. Fesenko E.E., Gluvstein A.Ya. Changes in the state of water, Induced by radiofrequensy electromagnetic fields // FEBS Lett. – 1995. – V. 367. – P.53–55.

39. Лобьшиев В.И., Рыжиков Б.Д., Шухлинская Р.Э. и др. Собственная люминесценция воды в сильно разбавленных растворах дипептидов // Биофизика. – 1994. – Т.39, №4. – С. 565–570.

40. Сусак И.П., Шигаев А.С., Пономарев О.А., Фесенко Е.Е. Моделирование взаимодействия магнитного поля с объемными вязаными структурами // Математика, компьютер, образование. Ч. 2 / Под ред. Г.Ю. Ризниченко. – М.; Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2002, – С.733–740.

Поступила в редакцию 04.08.2015

УДК (502.5:628.5):635.43

Влияние техногенного пылевого загрязнения на физиологические и цитогенетические характеристики семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.)

Г.В. Филиппова, И.А. Прокопьев, А.А. Шеин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Проведен сравнительный анализ физиологических и цитогенетических характеристик семенного потомства двух групп растений вида *Atriplex patula* L., произрастающих в условиях различных уровней пылевого техногенного загрязнения: 21 ± 1 и 843 ± 41 мг/(м²•сут). В образцах пыли, отобранных на участке с высокой степенью техногенной нагрузки, выявлено увеличение содержания меди в 1,7 раза, цинка в 1,5, кобальта в 2,0, стронция в 1,3 и свинца в 15,3 раза по сравнению с контролем. Показано, что повышенное содержание тяжелых металлов способно вызывать снижение показателей физиологических характеристик семенного потомства – всхожести на 80 % и длины корешка на 30 % относительно контроля. В клетках апикальной меристемы корешков проростков *A. patula* отмечено увеличение в 1,3 раза числа aberrантных клеток на фоне увеличения в 2,6 и 3,0 раза скорости включения ³H-тимидина и ¹⁴C-лейцина в клетки проростков соответственно относительно контроля.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, тяжелые металлы, семенное потомство, всхожесть, молекулярно-генетический аппарат, патологические митозы.

*A comparative analysis of the physiological and cytogenetic characteristics of two *Atriplex patula* seed progeny groups growing under different levels of anthropogenic dust pollution: 21 ± 1 and 843 ± 41 mg / (m² • d) is carried out. The dust samples collected at the site with a high degree of technological load showed an increase in the copper content of 1,7, zinc – 1,5, cobalt – 2,0, strontium – 1,3 and lead – 15,3 times in comparison with the control. It has been shown that high content of heavy metals is can cause a decline in physiological characteristics of seed progeny up to 80% of germination and 30% of the length of rootlets in comparison with control. In the cells of the apical meristem root of *A. patula* seedlings increase of 1,3 times of the number of aberrant cells on the background of increase of 2,6 and 3,0 times of the rate of incorporation of ³H-thymidine and ¹⁴C-leucine into the cells compared with the control seedlings is observed.*

Key words: technogenic pollution, heavy metals, seed progeny, germination, molecular genetic apparatus, abnormal mitosis.

ФИЛИППОВА Галина Валерьевна – к.б.н., с.н.с., nureeva@yandex.ru; ПРОКОПЬЕВ Илья Андреевич – к.б.н., с.н.с., a_prokopiev@mail.ru; ШЕИН Алексей Анатольевич – к.б.н., с.н.с., bg98saa@yandex.ru.

36. Kordyum E., Bogatina N. Cyclotron-based effects on plant gravitropism M. Sobol [et al.] // Journal of Advances in Space Reseach. – 2007. – V. 39, №7. – P. 1210–1218.

37. Беижий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 4.

38. Fesenko E.E., Gluvstein A.Ya. Changes in the state of water, Induced by radiofrequensy electromagnetic fields // FEBS Lett. – 1995. – V. 367. – P.53–55.

39. Лобьшиев В.И., Рыжиков Б.Д., Шухлинская Р.Э. и др. Собственная люминесценция воды в сильно разбавленных растворах дипептидов // Биофизика. – 1994. – Т.39, №4. – С. 565–570.

40. Сусак И.П., Шигаев А.С., Пономарев О.А., Фесенко Е.Е. Моделирование взаимодействия магнитного поля с объемными вязаными структурами // Математика, компьютер, образование. Ч. 2 / Под ред. Г.Ю. Ризниченко. – М.; Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2002, – С.733–740.

Поступила в редакцию 04.08.2015

УДК (502.5:628.5):635.43

Влияние техногенного пылевого загрязнения на физиологические и цитогенетические характеристики семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.)

Г.В. Филиппова, И.А. Прокопьев, А.А. Шеин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Проведен сравнительный анализ физиологических и цитогенетических характеристик семенного потомства двух групп растений вида *Atriplex patula* L., произрастающих в условиях различных уровней пылевого техногенного загрязнения: 21 ± 1 и 843 ± 41 мг/(м²•сут). В образцах пыли, отобранных на участке с высокой степенью техногенной нагрузки, выявлено увеличение содержания меди в 1,7 раза, цинка в 1,5, кобальта в 2,0, стронция в 1,3 и свинца в 15,3 раза по сравнению с контролем. Показано, что повышенное содержание тяжелых металлов способно вызывать снижение показателей физиологических характеристик семенного потомства – всхожести на 80 % и длины корешка на 30 % относительно контроля. В клетках апикальной меристемы корешков проростков *A. patula* отмечено увеличение в 1,3 раза числа aberrантных клеток на фоне увеличения в 2,6 и 3,0 раза скорости включения ³H-тимидина и ¹⁴C-лейцина в клетки проростков соответственно относительно контроля.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, тяжелые металлы, семенное потомство, всхожесть, молекулярно-генетический аппарат, патологические митозы.

*A comparative analysis of the physiological and cytogenetic characteristics of two *Atriplex patula* seed progeny groups growing under different levels of anthropogenic dust pollution: 21 ± 1 and 843 ± 41 mg / (m² • d) is carried out. The dust samples collected at the site with a high degree of technological load showed an increase in the copper content of 1,7, zinc – 1,5, cobalt – 2,0, strontium – 1,3 and lead – 15,3 times in comparison with the control. It has been shown that high content of heavy metals is can cause a decline in physiological characteristics of seed progeny up to 80% of germination and 30% of the length of rootlets in comparison with control. In the cells of the apical meristem root of *A. patula* seedlings increase of 1,3 times of the number of aberrant cells on the background of increase of 2,6 and 3,0 times of the rate of incorporation of ³H-thymidine and ¹⁴C-leucine into the cells compared with the control seedlings is observed.*

Key words: technogenic pollution, heavy metals, seed progeny, germination, molecular genetic apparatus, abnormal mitosis.

ФИЛИППОВА Галина Валерьевна – к.б.н., с.н.с., nureeva@yandex.ru; ПРОКОПЬЕВ Илья Андреевич – к.б.н., с.н.с., a_prokopiev@mail.ru; ШЕИН Алексей Анатольевич – к.б.н., с.н.с., bg98saa@yandex.ru.

Введение

Известно, что хроническое техногенное загрязнение приводит к накоплению значительного количества ионов тяжелых металлов в системе почва–растение [1]. Длительное воздействие техногенных загрязнителей, в зависимости от дозы, способно вызвать в растительных клетках, как токсические эффекты, так и активировать приспособительные физиологические, цитологические, биохимические и другие реакции [2].

В настоящее время в условиях возрастающего техногенного воздействия на биологические системы для оценки качества среды обитания широко используются методы биотестирования, основанные на ответной реакции живых организмов [3, 4]. Цитогенетический подход при оценке техногенного загрязнения занимает важное место в общей системе биомониторинга окружающей среды и позволяет оценить сочетанное действие всех факторов окружающей среды [5]. И если результатом общего токсического действия поллютантов является элиминация нежизнеспособных особей, то последствия отдаленных эффектов отражаются на состоянии потомства, что приводит к изменению генетического статуса популяции в целом [6]. Изучению ответной реакции растительных организмов в условиях техногенного стресса посвящено много работ. Главным образом, цитологические и физиологические исследования ведутся на хвойных и других древесных видах растений, произрастающих вблизи промышленных предприятий и автомагистралей [3, 4]. Цитогенетические исследования семенного потомства дикорастущих травянистых растений ограничены незначительным количеством видов и в основном проводятся в рамках изучения влияния хронического ионизирующего облучения [7].

Цель работы – изучить физиологические и цитогенетические эффекты, вызванные действием техногенного загрязнения пылью, содержащей повышенные концентрации тяжелых металлов, у семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.), произрастающей в условиях резко континентального климата и многолетней мерзлоты Центральной Якутии.

Материал и методы

Лебеда раскидистая (*Atriplex patula* L.), однолетнее травянистое растение, относится к семейству маревых (*Chenopodiaceae*), растёт вдоль дорог, на сорных, рудеральных местах и солончаковых лугах [8]. Выбор *A. patula* обусловлен тем, что она является полизональным, мезоксерофитным, факультативно синантропным видом растения с большим количеством индивидов в местах компактного произраста-

ния, а также обладает достаточно высокой семенной продуктивностью и полиморфностью [9].

Семена *A. patula* были собраны в 2009 г. на территории и в окрестностях г. Якутска. Контрольная группа растений (n=10) произрастала в условиях с минимальной антропогенной нагрузкой, уровень запыления составлял 20 мг/(м²·сут). Вторая группа материнских особей (n=9) произрастала вблизи автомагистрали с интенсивной нагрузкой и испытывала воздействие техногенного характера, уровень пылевого загрязнения составлял 840 мг/(м²·сут). Сбор семенного потомства проводился индивидуально с каждого материнского растения.

Оценка степени поверхностного пылевого загрязнения была выполнена стандартным методом [10]. С изученных участков были отобраны пробы снежного покрова, глубина которого составляла 30 см, а площадь 0,25 м². После плавления снега воду выпаривали и взвешивали оставшийся осадок, который характеризовал степень пылевого загрязнения участков; расчет производился в мг/(м²·сут). Анализ содержания ряда тяжелых металлов в образцах пыли, отобранных в местах компактного произрастания *A. patula*, был проведен в аналитическом центре Всероссийского геологического института им. А.П. Карпинского методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с использованием прибора ELEMENT-2 фирмы «Thermo Finnigan» (Германия).

Семена проращивали в чашках Петри на фильтрах по 50 шт. в 4-х повторностях при комнатной температуре (20–24 °С) и 16-часовом световом периоде. Определение лабораторной всхожести и длины корешка проводили на 7-й день с использованием стандартных методов [11].

Исследование на наличие патологических митозов проводилось на корешках проростков длиной 0,8–1,0 см, которые фиксировали смесью 96 %-го этилового спирта и ледяной уксусной кислоты в соотношении 3:1 в течение 12 ч и далее окрашивали ацеоорсеином. Препараты просматривали под световым микроскопом (Axiostar plus, Carl Zeiss, Германия). Аберрации хромосом (мосты и фрагменты) и нарушения клеточных делений (отставание хромосом) учитывали ана-телофазным методом. Для определения активности деления клеток использовали показатель митотического индекса (%), который определяли отношением числа клеток, находящихся в митозе от их общего числа. Относительную продолжительность фаз митоза (%) оценивали от количества делящихся клеток [12].

Скорость одновременного включения ³Н-тимидина в молекулы ДНК и ¹⁴С-лейцина в молекулы белка меристематических клеток проростков определялась радиоиндикаторным методом с помощью жидкостного сцинтилляционного счетчика Rackbeta II фирмы «LKB-Wallac» (Швеция–Финляндия) [13]. Корешки проростков инкубировали 24 ч в среде, содержащей по 100 мкл ³Н-тимидина (2,2 ПБк/моль) и ¹⁴С-лейцина (1,97 ТБк/моль). Далее корешки гомогенизировали в 0,1 М Na-фосфатном буфере (рН 7,4) и центрифугировали 10 мин при 2500 g. Белки и нуклеопротеиды осаждали из супернатанта добавлением 5 %-го раствора ТХУ и отделяли их фильтрованием, после чего определяли интенсивность β-излучения фильтров в толуольном сцинтилляторе.

Значимость отличия от контроля оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни (U-критерий) при уровне $p < 0,05$. Расчет стандартной ошибки среднего и коэффициента вариации проводился с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, v.2007.

Результаты и обсуждение

По результатам анализов санитарно-гигиенической оценки состояния почвенного покрова, полученных в лаборатории физико-химических методов анализа ФГНУ ИПЭС, в месте сбора семян *A. patula* (центр г. Якутска) выявлено повышенное содержание подвижных форм меди (до 126 мг/кг при ПДК= 3 мг/кг), цинка (до 383 мг/кг при ПДК=23 мг/кг) и свинца (до 360 мг/кг при ПДК= 6 мг/кг), что, вероятно, обусловлено повышенным более чем в 40 раз уровнем пылевого загрязнения в сравнении с контролем. В пробах почв, собранных с контрольного участка, содержание подвижных форм меди, цинка и свинца не превышало значений ПДК [14].

Пыль, собранная с загрязненного участка, отличалась от контроля по валовому содержанию 4 элементов из 11 исследованных (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Sr, Mo; табл. 1). В данной пробе отмечено увеличение содержания меди в 1,7, цинка – в 1,5, кобальта – в 2,0,

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в пыли в зависимости от степени техногенного пылевого загрязнения места произрастания *A. patula* и ПДК в почвах

Образец	Запыление, мг/(м ² ·сут)	Содержание, мг/кг				
		Cu	Zn	Co	Sr	Pb
Контроль	21±1,0	24,4	113,0	4,9	527,0	2,9
Запыление	843±41,0*	40,6	170,0	9,5	668,0	45,0
ПДК (почва)	-	3,0	23,0	-	-	6,0

*Различия статистически значимы по сравнению с контролем $p < 0,05$ (U-критерий).

стронция – в 1,3 и свинца – в 15,3 раза по сравнению с контрольным образцом.

Почва, как и снежный покров, является средой, депонирующей различного рода загрязнители. На территории г. Якутска и его окрестностей имеются все условия для концентрирования различных химических элементов: преобладание мелкодисперсных частиц (в том числе пылевых), активно развивающиеся процессы засоления и подщелачивания среды, наличие мерзлотного горизонта и т.д. [14]. В этой связи определение степени поверхностного пылевого загрязнения позволяет оценить влияние некоторых источников техногенного загрязнения, среди которых большую долю занимает автотранспорт, в формировании ответных физиолого-биохимических реакций биологических систем на примере *A. patula*.

Для выявления адаптивной реакции *A. patula* на действие загрязнения пылью, содержащей тяжелые металлы, были проведены физиологические и цитогенетические исследования ее семенного потомства. Произрастание в условиях техногенной нагрузки вызывает достоверное снижение в 1,8 раза лабораторной всхожести семенного потомства по сравнению с контролем (табл. 2). Коэффициент вариации данного параметра составлял 96,0 %, что на 40,5 % больше, чем в контрольной группе. По длине корешков 7-дневных проростков также наблюдалось достоверное снижение в 1,3 раза среднего значения по выборке по отношению к контролю, при этом коэффициент вариации данного параметра

Таблица 2

Влияние уровня запыления на некоторые физиологические и биохимические показатели проростков семян *A. patula*

	Всхожесть, %	Длина корешка, мм	Скорость включения	
			³ Н-тимидин, фмоль/г сырой массы, сут	¹⁴ С-лейцин, пмоль/г сырой массы, сут
<i>Контроль (21 ± 1 мг/(м²·сут))</i>				
Среднее (n=10)*	15,2±2,4	23,5±2,4	4,3±0,8	4,2±0,8
CV, %	55,5	28,4	59,4	60,3
<i>Запыление (843 ± 41 мг/(м²·сут))</i>				
Среднее (n=9)*	8,4±3,6*	18,3±0,8**	11,0±2,8**	12,4±2,7**
CV, %	96,0	13,4	80,0	67,8

*Количество материнских растений, семена, которых использовались в исследовании. ** Различия статистически значимы по сравнению с контролем $p < 0,05$ (U-критерий).

для варианта с запылением составлял 13,4 %, для контроля – 28,4 %.

Следовательно, высокий уровень запыления 843 мг/(м²·сут) является сильным стресс-фактором, который приводит к значительному снижению и варьированию в широком диапазоне средних значений показателей физиологических характеристик семенного потомства *A. patula*.

Поскольку одним из адаптивных механизмов реагирования на условия обитания и/или стресс является увеличение цитогенетической изменчивости и активности молекулярно-генетического аппарата [4], нами были исследованы: активность молекулярно-генетических процессов (репликация и репарация ДНК, характеризуемые скоростью включения ³H-тимидина и трансляция белка, характеризуемая скоростью включения ¹⁴C-лейцина), митотическая активность апикальной меристемы корешков, а также соотношение фаз митоза и частота встречаемости патологических митозов в клетках корешков проростков семенного потомства *A. patula*.

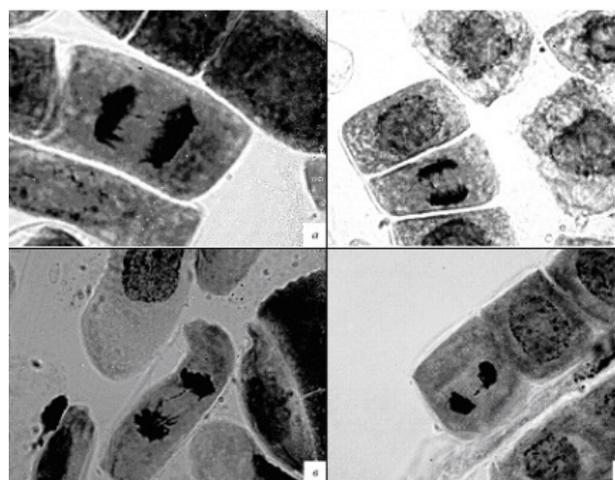
Установлено, что активность молекулярно-генетических процессов в клетках 7-дневных проростков семенного потомства, сформированного в условиях высокой стрессовой нагрузки, была выше контроля в 2,6 и 3,0 раза по включению ³H-тимидина и ¹⁴C-лейцина соответственно. Отмечена высокая вариабельность показателя активности данных процессов у семенного потомства внутри контрольной группы, а повышение интенсивности пылевого загрязнения приводит к еще большему диапазону колебаний по этой выборке (табл.2), что указывает на формирование адаптивных процессов, позволяющих расширить популяционный диапазон устойчивости семенного потомства к экстремальным условиям произрастания [2].

Следует отметить, что показатель митотической активности клеток корневой меристемы в контрольной выборке варьировал от 3,5 до 3,9%, в варианте с запылением – от 4,0 до 4,4 %. Можно предположить, что увеличение значения митотического индекса при уровне пылевого загрязнения 840 мг/(м²·сут) вызвано скорее не усилением митотической активности клеток, а задержкой в прохождении фаз митоза. Так, среди делящихся клеток увеличивается относительная доля тех, которые пребывают на стадии анафазы. Очевидно, это является следствием возникновения большего числа патологических митозов, которые нарушают течение этой стадий деления и задерживают цитокинез (табл.3).

Повышение в 1,1 раз митотического индекса клеток корешков и уменьшение в 1,3 раза длины

7-дневных корешков на фоне значительного повышения в 2,6 раз скорости включения ³H-тимидина может указывать на превалирование механизмов матричных процессов, направленных на репарацию ДНК относительно контроля, у проростков семенного потомства, сформированного в условиях техногенного пылевого загрязнения. В свою очередь, повышение в 3,0 раза скорости включения ¹⁴C-лейцина указывает на усиление процесса трансляции белка в клетках исследованных проростков, что, возможно, связано с более активным замещением или восстановлением поврежденных белков и клеточных структур [15].

При цитологическом исследовании делящихся клеток корневой меристемы проростков *A. patula* были обнаружены клетки со следующими видами нарушений: хромосомные и хроматидные мосты, одиночные фрагменты, отстающие хромосомы (рисунок). Эти виды патологических митозов были характерны как для контрольной выборки, так и для выборки с запылением. В контроле доля клеток с аномалиями составляла 10 %, из них (в пересчете на 100 % аномальных): 69 % – отстающие хромосомы, 30 % – мосты, 1 % – фрагменты. В апикальной меристеме корешков проростков семян, сформированных в условиях интенсивного запыления, доля клеток с аномалиями составляла 13 %, из которых клеток с отстающими хромосомами (в пересчете на 100 % аномальных) – 69 %, мостами – 24 %, число клеток с фрагментами выросло до 7 %, что согласуется с цитогенетическими исследованиями по влиянию тяжелых металлов на растения [16].



Хромосомные аномалии в анаелофазах митоза *A. patula*: а – одиночный фрагмент; б – хромосомный мост; в – хроматидный мост; г – отстающая хромосома. Об. 100х, ок. 16х

Заключение

Таким образом, произрастание *A. patula* в условиях интенсивного пылевого загрязнения с высоким содержанием тяжелых металлов приводит к снижению на 80 % всхожести семенного потомства и вызывает замедление на 30 % интенсивности ростовых процессов у проростков относительно контроля. Возможно, задержка в росте на начальных этапах формирования корневой системы является следствием нарушения процессов клеточного деления. Так, в корешках проростков отмечено повышение в 1,3 раза числа патологических митозов, выраженное в увеличении числа фрагментов в анаелофазах деления, относительно контроля. Повышение в 2,6 раз и в 3,0 раза скорости включения ³H-тимидина и ¹⁴C-лейцина в клетки проростков соответственно указывает на превалирование у них процессов, направленных на репарацию ДНК и усиление процесса трансляции белка, что, по-видимому, позволяет обеспечить устойчивость и выживание *A. patula* в условиях техногенного загрязнения среды.

Литература

1. Ларина Г.Е., Обухов А.И. Тяжелые металлы в растительности с газонов вдоль автомагистралей // Вестник МГУ. – 1995. – Сер. 17, №3. – С. 41–48.
2. Прокотьев И.А., Журавская А.Н., Филиппова Г.В. Изменчивость биохимических параметров и радиустойчивость семенного потомства дескурайнии гулявниковой и клоповника безлепестного под действием различных факторов // Экология. – 2011. – № 4. – С. 259–265.
3. Буторина А.К., Калаев В.Н., Карпова С.С. Цитогенетические нарушения в соматических клетках человека и березы повислой в районах г. Воронежа с различной интенсивностью антропогенного загрязнения // Экология. – 2002. – № 6. – С. 438–441.
4. Калашиник Н.А. Характеристика естественных насаждений хвойных видов южного Урала по цитогенетическим показателям // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6. – С. 157–160.
5. Калаев В.Н., Карпова С.С. Цитогенетический мониторинг: методы оценки загрязнения окружающей среды и состояния генетического аппарата организма: Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. – 80 с.
6. Горовая А.И., Бобырь Л.Ф., Скворцова Т.В. Методологические аспекты оценки мутагенного фона и генетического риска для человека и биоты от действия мутагенных экологических факторов // Цитология и генетика. – 1996. – Т. 30, №6. – С. 78–86.
7. Евсеева Т.И., Гераськин С.А., Фролова Н.П., Храмова Е.С. Использование природных популяций *Taraxacum officinale* Wigg. для оценки состояния техногенно нарушенных территорий // Экология. – 2002. – Т. 33, № 5. – С. 370–373.
8. Иванова В.П. Двудольные растения окрестностей г. Якутска (определитель). – Якутск: ЯГУ, 1990. – 160 с.
9. Черосов М.М., Слепцова Н.П., Миронова С.И. и др. Синтаксономия синантропной растительности Якутии. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 575 с.
10. Василенко В.Н., Назаров И.Н., Фридман Ш.Б. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
11. Вавилов П.П., Гриценко В.В., Кузнецов В.С. Практикум по растениеводству. – М.: Колос, 1983. – 352 с.
12. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. – М.: Колос, 1974. – 288 с.
13. Остерман Л.А. Исследование биологических макромолекул электрофокусированием, иммуноэлектрофорезом и радиоизотопными методами. – М.: Наука, 1983. – 304 с.
14. Сивцева Н.Е., Легостаева Я.Б., Макаров В.С., Васильев Н.Ф. Экологическая оценка состояния территории г. Якутска по суммарному показателю загрязнения почвенного покрова // Вестник СВФУ. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 30–35.
15. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. – М.: КДУ, 2007. – 140 с.
16. Chandraa S. Comparative biomonitoring of leachates from hazardous solid waste of two industries using *Allium* test // Science of the Total Environment. – 2005. – Vol. 347, – P. 46–52.

Поступила в редакцию 02.06.2015

Общая биология

УДК 631.417.2:551.345.3 (282.256.65)

Гумусное состояние мерзлотных пойменных почв долины средней Лены

М.В. Оконешникова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Проведена оценка показателей гумусного состояния широко используемых в сельскохозяйственном производстве мерзлотных пойменных почв долины средней Лены. Определены характеристики гумуса (содержание и запасы гумуса, степень гумификации органического вещества, соотношение гуминовых и фульвокислот). Разное положение в рельефе аллювиальных дерновых почв и различия режимов затопления (условий увлажнения) определяют разную выраженность количественных показателей гумусного состояния. Содержание и запасы гумуса уменьшаются, степень гумификации органического вещества повышается и тип гумуса меняется в сторону наибольшей гуматности в ряду дерновые глееватые (низкая пойма) – дерновые типичные почвы (средняя пойма). Очень высокая и высокая степень гумификации органического вещества, гуматный и фульватно-гуматный типы гумуса, закрепление значительной части гумусовых веществ в виде гуматов кальция (ГК-2) в верхних горизонтах обуславливают высокое плодородие аллювиальных дерновых типичных почв.

Ключевые слова: гумус, плодородие, гумусовые вещества, фракционный состав, тип гумуса.

The humus state indices of frozen floodplain soils of the middle Lena River widely used in agricultural production have been estimated. The following characteristics of humus have been described: the content and deposition of humus, the degree of humification of the organic matter, the correlation of humic and fulvic acids. Different position of alluvial sod soils within the relief and differences in flooding conditions (moistening conditions) characterize the different evidence of the quantitative indices of humus state. The content and humus deposition decrease, as the degree of humification of the organic matter rises, and the type of humus changes toward the maximum humate state in the row of sod gley soils (low floodplain) toward typical sod soils (middle floodplain). High degrees of humification of the organic matter, the humate and fulvate types of humate humus, and fixation of the majority of humus matters in the form of calcium humates (HC-2) in upper horizons, result in high fertility of typical alluvial sod soils.

Key words: humus, fertility, humus substances, fraction composition, type of humus.

Введение

В кормопроизводстве Республики Саха (Якутия) большое хозяйственное значение имеют пойменные луга. Это самые урожайные луга среди всех 4 групп лугов Якутии (аласных, пойменных, мелководных и суходольных). Площадь пойменных лугов центральных районов Якутии составляет 87,5 тыс. га или 28,1 % всех сенокосов, с которых собирается 37,0 % сена [1]. Высокая продуктивность пойменных лугов долины р. Лены в условиях засушливого климата Центральной Якутии обусловлена повышенным увлажнением пойменных ландшафтов по сравнению с аласными, более благопри-

ятными микроклиматическими условиями и высокой производительностью почв [2].

При решении проблем, связанных с сохранением, восстановлением и повышением плодородия широко используемых в сельскохозяйственном производстве мерзлотных пойменных почв долины средней Лены, важную информацию дает гумусное состояние почв, которое к настоящему времени практически не изучено.

Цель данной работы – на основе изучения группового и фракционного состава гумуса провести оценку гумусного состояния аллювиальных дерновых мерзлотных почв долины средней Лены.

Материалы и методы исследования

Район исследований расположен в центральной, прилегающей к г. Якутску части долины р. Лены (61°5'с.ш.), и охватывает пойменные

ОКОНЕШНИКОВА Матрена Васильевна – к.б.н., с.н.с., mvok@yandex.ru.

ГУМУСНОЕ СОСТОЯНИЕ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЙМЕННЫХ ПОЧВ ДОЛИНЫ СРЕДНЕЙ ЛЕНЫ

луговые комплексы на левом и правом берегах. Условия почвообразования и подробная характеристика почвенного покрова поймы р. Лены были приведены в ранее опубликованных работах [2–3]. Почвенные разрезы для изучения фракционно-группового состава гумуса заложены на высокопродуктивных участках настоящих лугов низкой и средней поймы, имеющих большую хозяйственную ценность. Биологическая урожайность лугов в годы исследований составляла 46–58 ц/га [4].

Участок 1. Плоский увал ежегодно затапливаемой низкой поймы на правом берегу р. Лены. Разнотравно-лисохвостно-ячменный луг. Почва аллювиальная дерновая глееватая мерзлотная (разр. 9). Формула морфологического строения: A_d (0–3 см) – AO (3–11 см) – B_f (11–27 см) – C_g (27–85 см). Особые отметки: грубогумусовый горизонт AO включает органические вещества разной стадии разложения, в том числе древесные корни и включения углей, признаки оглеения отмечаются в виде обильных охристых точек и примазок сразу под дерново-гумусовым горизонтом, C_g – мокрый песок с многочисленными серыми горизонтальными супесчаными прослойками и охристыми примазками, на момент описания в нижней части горизонта мгновенно появилась в воде.

Участок 2. Широкая ровная часть средней поймы на левом берегу р. Лены. Имеет неустойчивый по годам режим затапливания. Злаково-разнотравно-кровохлебковый луг. Почва аллювиальная дерновая типичная мерзлотная (разр. 13). Формула морфологического строения: A_d (0–4 см) – A (4–27 см) – B_f (27–47 см) – BC_f (47–105 см).

Участок 3. Плоский увал средней поймы на левом берегу р. Лены. Злаково-разнотравный луг (кровохлебка, герань, клевер, василистник). Почва аллювиальная дерновая типичная мерзлотная (разр. 14). Формула морфологического строения: A_d (0–2 см) – A (2–15 см) – B (15–34 см) – BC_f (34–107 см).

Содержание и качественный состав гумуса определены по методу И.В. Тюрина в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [5]. Для сравнительной оценки гумусного состояния почв использовались показатели, предложенные Л.А. Гришиной и Д.С. Орловым [6]. При характеристике мощности гумусового горизонта и содержания фракции $FK-1a$ дополнительно применялась новая расширенная система показателей Д.С. Орлова и О.Н. Бирюковой [7].

Результаты и обсуждение

Для изученных пойменных почв характерны отсутствие погребенных гумусовых горизонтов,

резко и постепенно убывающие профили с максимумом накопления гумуса в верхней ее части. Процессы гумусообразования протекают на фоне близкой к нейтральной реакции среды, насыщенной основаниями, и супесчано-песчаного гранулометрического состава (табл. 1).

Очень высоким содержанием гумуса в мало-мощном грубогумусовом горизонте AO (15,8 %) отличаются аллювиальные дерновые глееватые почвы участка 1, формирующиеся при длительном затапливании паводковыми водами. В условиях избыточной влажности разложение растительных остатков происходит не полностью и верхняя часть профиля почвы обогащается органическим веществом. Степень гумификации органического вещества слабая при низкой растворимости образующихся гумусовых веществ ($ГВ$) в грубогумусовом горизонте, где содержание негидролизующего остатка ($НО$) достигает 65 %. На глубине 11–27 см количество гумуса резко уменьшается до очень низкого уровня (1,7 %), растворимость $ГВ$ повышается. Следует отметить, что очень низкое содержание общего углерода в оглеенном горизонте C_g (0,05 %) не позволило провести его фракционирование. Запасы гумуса в слое 0–20 см средние (в слое 0–100 см не удалось определить из-за небольшой мощности профиля). Тип гумуса фульватно-гуматный. Основные компоненты $ГВ$ представлены всеми фракциями. В составе $ГВ$ преобладают гуминовые кислоты ($ГК$), значительную их долю составляют наиболее упрощенные по строению «свободные» $ГК-1$ (40–41 %), они достигают среднего уровня (табл. 2–3).

Таблица 1
Основные физико-химические показатели мерзлотных пойменных почв

Горизонт	Глубина, см	V , г/см ³	Сумма частиц <0,01 мм, %	Гумус, %	рН (H ₂ O)	Обменные катионы, мг-экв/100 г почвы		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма
Участок 1, разр. 9 аллювиальная дерновая глееватая								
AO	3–11	0,7	19,3	15,8	7,3	42,0	23,1	65,1
B_f	11–27	1,3	12,8	1,7	7,2	21,1	19,2	40,3
C_g	27–85	1,4	3,0	0,1	6,8	6,4	6,4	12,8
Участок 2, разр. 13 аллювиальная дерновая типичная								
A	4–27	1,1	20,5	3,8	7,3	24,5	22,4	46,9
B_f	27–47	1,1	17,5	1,3	7,2	24,2	12,9	37,1
BC_f	47–105	1,2	9,8	1,1	7,1	17,2	12,0	29,2
Участок 3, разр. 14 аллювиальная дерновая типичная								
A	2–15	1,1	18,7	3,9	7,3	21,8	23,6	45,4
B_f	15–34	1,1	16,4	1,4	7,0	16,4	20,1	36,5
BC_f	34–107	1,2	7,8	1,2	7,0	12,7	12,7	25,4

Показатели гумусного состояния мерзлотных пойменных почв

Признак	Участок 1 дерновая глееватая	Участок 2 дерновая типичная	Участок 3 дерновая типичная
Мощность гумусового горизонта, см	Маломощный 8	Среднетипичный 23	Слабосреднемощный 13
Содержание гумуса, %	Очень высокое– очень низкое 15,8–0,1	Низкое– очень низкое 3,8–1,1	Низкое– очень низкое 3,9–1,2
Запасы гумуса в слое 0–20 (0–100) см	Средние 115 (-)*	Низкие 84 (191)	Низкие 72 (182)
Распределение гумуса по профилю	Резко убывающее	Постепенно убывающее	Постепенно убывающее
Степень гумификации органического вещества (гор. А), Сгк/Собщ×100%	Слабая 19	Очень высокая 44	Высокая 37
Тип гумуса (гор. А), Сгк/Сфк	Фульватно-гуматный 1,58	Гуматный 2,26	Фульватно-гуматный 1,75
Содержание «свободных» ГК, % к сумме ГК	Среднее 40–41	Очень низкое–среднее 18–46	Низкое 21–39
Содержание ГК, связанных с Ca ²⁺ , % к сумме ГК	Низкое 28–36	Низкое–среднее 31–57	Низкое–среднее 31–52
Содержание прочно связанных ГК, % к сумме ГК	Высокое 23–32	Высокое 23–27	Высокое 27–30
Содержание фракции ФК-1а, % от Собщ	Очень низкое– низкое 1,8–4,9	Низкое– среднее 3,9–9,0	Низкое– среднее 4,1–8,3

Количество связанных с Ca²⁺ гуминовых кислот ГК-2 низкое (28–36 %), прочно связанных гуминовых кислот ГК-3 высокое (23–32 %).

В составе фульвокислот (ФК) также выражено преобладание фракции ФК-1 в верхнем грубогумусовом горизонте АО (44 % от суммы ФК), вниз по профилю ее доля снижается при значительном повышении (в 2 раза) доли связанной с Ca²⁺ фракции ФК-2. Содержание свободной фракции ФК-1а очень низкое и низкое (1,8–4,9 % от Собщ).

Аллювиальные дерновые типичные почвы участка 2, развитые на средней пойме под злаково-разнотравно-кровохлебковым лугом, характеризуются наличием достаточно мощного для мерзлотных почв Якутии гумусового горизонта А (23 см), который, согласно [7], соответствует уровню среднетипичный с низким содержанием гумуса (3,8 %). Минеральная часть профиля имеет очень низкое содержание гумуса с равномерным распределением его в горизонтах В_f и ВС_f. Запасы гумуса в слоях 0–20 см и 0–100 см низкие.

Степень гумификации органического вещества очень высокая – высокая (44–33 %). Гуматный тип гумуса в горизонте А (Сгк/Сфк 2,26) становится фульватно-гуматным в горизонте В_f (Сгк/Сфк 1,23) и гуматно-фульватным в горизонте ВС_f (Сгк/Сфк 0,66) преимущественно за счет повышения содержания фульвокислот. Очень высокую степень гумификации органического вещества и гуматный состав гумуса в горизонте А аллювиальных дерновых почв средней поймы, вероятно, следует объяснить оптимальным гидротермическим режимом, когда неустойчивый режим затопления создает наиболее благоприятные условия микробиологической деятельности (на общем фоне биоло-

Т а б л и ц а 2

Групповой и фракционный состав гумуса мерзлотных пойменных почв (% от С общ)

Глубина, см	Собщ, %	Гуминовые кислоты			Фульвокислоты				Сгк/Сфк	НО
		1	2	3	1а	1	2	3		
Участок 1, разр. 9 аллювиальная дерновая глееватая										
3–11	9,2	7,6	5,2	6,0	1,8	5,3	1,5	3,3	1,58	69,3
11–27	1,0	16,5	14,6	9,5	4,9	8,2	8,4	9,8	1,29	28,1
Участок 2, разр. 13 аллювиальная дерновая типичная										
4–27	2,2	8,2	25,2	10,9	3,9	8,6	1,6	5,5	2,26	36,1
27–47	0,8	13,6	17,1	11,3	8,6	13,8	5,1	6,7	1,23	23,8
47–105	0,6	15,3	10,3	7,5	9,0	9,3	25,5	6,2	0,66	16,9
Участок 3, разр. 14 аллювиальная дерновая типичная										
2–15	2,3	7,9	19,3	10,1	4,1	4,7	5,7	6,8	1,75	41,4
15–34	0,8	11,5	16,0	11,2	4,8	5,6	7,8	11,8	1,29	31,3
34–107	0,7	12,8	10,4	9,9	8,3	9,1	29,7	5,9	0,62	13,9

Прочерк означает, что в данном слое запасы гумуса не определены.

гической активности существуют периоды депрессии при высыхании почвы в условиях общего недостаточного увлажнения Центральной Якутии) и подобно черноземам степной зоны [8] способствует формированию почв с большим содержанием гуминовых кислот.

Основная масса ГВ в верхней части профиля представлена в виде связанных с Ca²⁺ фракции ГК-2 (57 % от суммы ГК), в нижней минеральной части соответственно увеличивается доля

фракции ФК-2 (51 % от суммы ФК). Доля «свободных» ГК-1 повышается вниз по профилю (от 18 до 46 % от суммы ГК) и варьирует от очень низкого до среднего уровня, доля прочно связанной с глинистыми минералами фракции ГК-3 распределяется равномерно (23–27 % от суммы ГК) и оценивается как высокая. Содержание фракции ФК-1а вниз по профилю увеличивается от низкого до среднего уровня (от 3,9 до 9,0 % от Собщ).

Аллювиальные дерновые типичные почвы участка 3, формирующиеся на плоском увале средней поймы под злаково-разнотравным лугом, имеют очень близкие значения показателей гумусного состояния с почвами участка 2 не только по содержанию и запасам общего гумуса, но и по содержанию и профильному распределению всех фракций ГК и ФК. Это низкое и очень низкое содержание гумуса, низкие запасы гумуса, постепенно убывающее распределение гумуса, низкое–среднее содержание ГК-2, высокое содержание ГК-3 и низкое–среднее содержание фракции ФК-1а. Заметное различие проявляется в меньшей мощности гумусового горизонта А (13 см) с фульватно-гуматным типом гумуса (более узкое Сгк:Сфк 1,75) и изменении степени гумификации органического вещества в гор. А от очень высокого до высокого уровня (37 %).

Заключение

Разное положение в рельефе и различия режимов затопления (условий увлажнения) аллювиальных дерновых почв долины средней Лены определяют разную выраженность количественных показателей гумусного состояния. Содержание и запасы гумуса уменьшаются, степень гумификации органического вещества повышается и тип гумуса меняется в сторону наибольшей гуматности в ряду дерновые глее-

ватые (участок 1, низкая пойма) – дерновые типичные почвы (участок 2 и 3, средняя пойма). Очень высокая и высокая степень гумификации органического вещества, гуматный и фульватно-гуматный типы гумуса, закрепление значительной части ГВ в виде гуматов кальция (ГК-2) в верхних горизонтах обуславливают высокое плодородие аллювиальных дерновых типичных почв.

Литература

1. Матвеев И.А. Эффективность интенсификации сельского хозяйства Якутии. – М.: Колос, 1981. – 127 с.
2. Коноровский А.К. Режимы мерзлотных пойменных почв долины Лены. – Новосибирск: Наука, 1974. – 172 с.
3. Оконешикова М.В. Современное состояние и прогноз изменений почв долины средней Лены (Центральная Якутия) // Вестник ТГУ. Биология. – 2013. – № 3. – С. 7–18.
4. Оконешикова М.В., Николаева М.Х., Десяткин А.Р. Почвенные условия произрастания и урожайность лугов поймы Лены // Меры по реализации Президентской (государственной) программы социально-экономического развития села на период до 2006 года: Материалы VI респ. науч.-практ. конф. (15 апреля 2003 г., Якутск). – М.: Изд-во МСХА, 2004. – С. 277–281.
5. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. – Л.: Наука, 1980. – 222 с.
6. Гришина Л.А., Орлов Д.С. Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения. – М.: Наука, 1978. – С. 42–47.
7. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Система показателей гумусного состояния почв // Методы исследований органического вещества почв. – М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТНОУ, 2005. – С. 6–17.
8. Кононова М.М. Органическое вещество почв. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 314 с.

Поступила в редакцию 20.05.2015

УДК 581.9

Палеогеографические аспекты происхождения северотаежных лиственничников Якутии

А.В. Протопопов

Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

Приводятся результаты анализа географических элементов лесного флористического комплекса северотаежных лесов на примере лиственничников Яно-Индибирского междуречья. Сделан вывод о том,

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич – к.б.н., руководитель отдела, a.protopopov@mail.ru.

фракции ФК-2 (51 % от суммы ФК). Доля «свободных» ГК-1 повышается вниз по профилю (от 18 до 46 % от суммы ГК) и варьирует от очень низкого до среднего уровня, доля прочно связанной с глинистыми минералами фракции ГК-3 распределяется равномерно (23–27 % от суммы ГК) и оценивается как высокая. Содержание фракции ФК-1а вниз по профилю увеличивается от низкого до среднего уровня (от 3,9 до 9,0 % от Собщ).

Аллювиальные дерновые типичные почвы участка 3, формирующиеся на плоском увале средней поймы под злаково-разнотравным лугом, имеют очень близкие значения показателей гумусного состояния с почвами участка 2 не только по содержанию и запасам общего гумуса, но и по содержанию и профильному распределению всех фракций ГК и ФК. Это низкое и очень низкое содержание гумуса, низкие запасы гумуса, постепенно убывающее распределение гумуса, низкое–среднее содержание ГК-2, высокое содержание ГК-3 и низкое–среднее содержание фракции ФК-1а. Заметное различие проявляется в меньшей мощности гумусового горизонта А (13 см) с фульватно-гуматным типом гумуса (более узкое Сгк:Сфк 1,75) и изменении степени гумификации органического вещества в гор. А от очень высокого до высокого уровня (37 %).

Заключение

Разное положение в рельефе и различия режимов затопления (условий увлажнения) аллювиальных дерновых почв долины средней Лены определяют разную выраженность количественных показателей гумусного состояния. Содержание и запасы гумуса уменьшаются, степень гумификации органического вещества повышается и тип гумуса меняется в сторону наибольшей гуматности в ряду дерновые глее-

ватые (участок 1, низкая пойма) – дерновые типичные почвы (участок 2 и 3, средняя пойма). Очень высокая и высокая степень гумификации органического вещества, гуматный и фульватно-гуматный типы гумуса, закрепление значительной части ГВ в виде гуматов кальция (ГК-2) в верхних горизонтах обуславливают высокое плодородие аллювиальных дерновых типичных почв.

Литература

1. Матвеев И.А. Эффективность интенсификации сельского хозяйства Якутии. – М.: Колос, 1981. – 127 с.
2. Коновский А.К. Режимы мерзлотных пойменных почв долины Лены. – Новосибирск: Наука, 1974. – 172 с.
3. Оконешникова М.В. Современное состояние и прогноз изменений почв долины средней Лены (Центральная Якутия) // Вестник ТГУ. Биология. – 2013. – № 3. – С. 7–18.
4. Оконешникова М.В., Николаева М.Х., Десяткин А.Р. Почвенные условия произрастания и урожайность лугов поймы Лены // Меры по реализации Президентской (государственной) программы социально-экономического развития села на период до 2006 года: Материалы VI респ. науч.-практ. конф. (15 апреля 2003 г., Якутск). – М.: Изд-во МСХА, 2004. – С. 277–281.
5. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. – Л.: Наука, 1980. – 222 с.
6. Гришина Л.А., Орлов Д.С. Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения. – М.: Наука, 1978. – С. 42–47.
7. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Система показателей гумусного состояния почв // Методы исследований органического вещества почв. – М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТНОУ, 2005. – С. 6–17.
8. Кононова М.М. Органическое вещество почв. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 314 с.

Поступила в редакцию 20.05.2015

УДК 581.9

Палеогеографические аспекты происхождения северотаежных лиственничников Якутии

А.В. Протопопов

Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

Приводятся результаты анализа географических элементов лесного флористического комплекса северотаежных лесов на примере лиственничников Яно-Индибирского междуречья. Сделан вывод о том,

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич – к.б.н., руководитель отдела, a.protopopov@mail.ru.

что становление и распространение северотаежных лиственничных лесов на северо-востоке Азии напрямую связано с развитием криолитозоны в раннем плейстоцене. Структура и видовой состав северотаежной флоры показывает его близкое родство с тундровыми фитоценозами, с которыми она имеет общую составляющую в виде автохтонного гипоарктического ядра и общую эволюционную историю в течение всего плейстоцена. В то же время лесной флористический комплекс достаточно самобытен, и бореальный элемент флоры не имеет трансконтинентальных связей, обычных для темнохвойной тайги и тундры, что показывает отсутствие лесов в плейстоценовой истории Берингии.

Ключевые слова: лиственничные леса, флора, географический элемент флоры, плейстоцен, Берингия.

The work is the result of the analysis of floristic geographical elements of the forest complex of northern forests on the example of larch forests of Yano-Indigirka interfluve. It is concluded that the formation and distribution of northern larch forests in northeast Asia is directly linked with the development of the permafrost zone in the Early Pleistocene. The structure and species composition of the northern taiga flora shows its close relationship with tundra phytocenoses with which it has a common component in the form of indigenous Hypoarctic core and common evolutionary history during the Pleistocene. At the same time, forest floristic complex is enough original, and the boreal element of the flora does not have transcontinental links what are usual for dark taiga and tundra, and this fact once again shows the absence of forests in the Pleistocene history of Beringia.

Key words: larch forests, flora, geographical element of flora, pleistocene, Beringia.

Становление и распространение лиственниц – *Larix gmelinii* и *L. cajanderi* непосредственно связано с возникновением и развитием на Северном полушарии криолитозоны. По времени формирования *Larix gmelinii* приходится на ранний плейстоцен [1]. Лиственница Каяндера как вид обособилась в позднем плейстоцене и, вероятнее всего, связано это с дальнейшим нарастанием общего похолодания, возрастанием роли многолетней мерзлоты и усилением процессов ксерофитизации. Возможно, что большую роль в этом сыграла географическая изолированность участков лиственничной тайги по мере распространения безлесных пространств в сартанское время.

Одновременно с видообразованием лиственниц происходило становление флоры светлехвойной лиственничной тайги, и определенный интерес представляет выяснение флорогенетических связей между зональными типами растительности, получившими распространение на границе плейстоцена–голоцена, так как это может прояснить вопросы, связанные с глобальной перестройкой природных ландшафтов.

Исследования флорогенетической составляющей северотаежных лесов удобно вести на примере лиственничников Яно-Индибирского междуречья, которые в течение голоцена претерпели минимальные изменения в флористическом составе по сравнению с другими регионами Якутии в силу большей изолированности.

Материал и методика

Основной полевой материал являются геоботанические описания и гербарные сборы, проводившиеся в течение ряда лет с 1989 по 2014 г. Изучение растительного покрова проводилось общепринятыми лесоведческими методиками [2].

Для определения и выделения лесного флористического комплекса составлялся сводный список высших сосудистых растений, произрастание которых установлено для лесных участков.

Анализ географических элементов флоры для раскрытия пространственной взаимосвязи и истории становления флоры исследуемого региона проведен по схеме, разработанной [3]. Выделение элементов флоры производилось на основе сложившихся представлений о распространении растений [4–7].

Результаты и обсуждение

Неморальный флористический элемент, имеющий большой удельный вес в сложении флоры темнохвойной тайги [8], во флоре северотаежных лиственничных лесов отсутствует (табл. 1).

Таблица 1
Широтная структура лесного флористического комплекса Яно-Индибирского междуречья

Широтный элемент	Количество видов	Доля от общего количества видов, %
Арктический	2	0,8
Арктоальпийский	20	8,0
Гипоарктический	16	6,5
Гипоарктомонтанный	21	8,5
Арктобореальный	10	4,0
Арктобореально-монтанный	24	9,7
Бореальный	114	46,2
Монтанный	9	3,7
Бореально-монтанный	18	7,3
Степной	1	0,4
Бореально-степной	9	3,7
Монтанно-степной	3	1,2
Всего	247	100

Причисление активных в лиственничниках Яно-Индибирского междуречья видов из родов *Pyrola* и *Orthilia*, а также *Linnaea borealis* к облигатным элементам темнохвойной тайги [8] считаем маловероятным. Широкое распространение грушанковых и линнеи в светлохвойных лесах и их проникновение в тундровую зону показывает, что экологический оптимум видов, возможно, находится в зоне светлохвойных лиственничных лесов.

Типичные растения темнохвойной тайги, представленные во флоре Яно-Индибирского междуречья, *Goodayera repens* и *Cypripedium guttatum*, изредка встречаются в умеренно-влажных лиственничниках, где развитый подлесок дает хорошее затенение. *Lyseiella obtusata*, которая в центре своего ареала в Центральной Сибири произрастает только в темнохвойных лесах, на Яно-Индибирском междуречье встречается лишь в густых приречных кустарниковых зарослях. Таким образом, можно констатировать, что темнохвойный элемент в северотаежных лиственничниках представлен слабо, и это можно объяснить только тем, что флорогенез в этих двух таежных формациях происходил независимо друг от друга, и каждая из них обладает своим достаточно специфичным набором видов растений.

К бореальным элементам флоры относится *Arctostaphylos uva-ursi*, генетически связанная со светлохвойной тайгой. В среднетаежной зоне Якутии она предпочитает сухие и мезофильные сосновые и лиственничные леса на легких почвах. На Яно-Индибирском междуречье толочнянка, возможно, является реликтом некогда распространенных сосновых лесов и по среднему течению Яны проходит северная граница ареала распространения.

С гипоарктическим ботанико-географическим поясом [9] связаны гипоарктические, гипоарктомонтанные, арктобореально-монтанные, арктобореальные, бореально-монтанные и монтанные широтные элементы, количественно немного уступающие бореальным видам.

Такие гипоарктические и гипоарктомонтанные виды, как *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, *Betula exilis*, *Arctous erythrocarpa*, *Empetrum sibiricum*, *Ledum palustre*, *Duschekia fruticosa*, *Rubus chamaemorus*, *Callamagrostis lapponica*, являются эдификаторами и доминантами нижних ярусов лиственничной тайги. Малое видовое разнообразие и явное фитоценотическое процветание видов, относящихся к гипоарктическому флористическому элементу, активная жизненная стратегия указывают на их сравнительную молодость по сравнению с

бореальным флористическим элементом. Экологическая приуроченность большинства этих растений тяготеет к местопроизрастаниям с застойным и заболоченным типом увлажнения и связаны они с тундровыми сообществами и таежно-болотными лесными формациями, ставшими зональными по итогам природно-климатической перестройки на границе плейстоцена–голоцена. При общей аридности климата такие условия могут быть развиты только при наличии многолетнемерзлых грунтов и их близком залегании от поверхности.

Тот факт, что такие широтные элементы, как арктические и степные, играют незначительную роль в лесном флористическом комплексе, свидетельствует об отсутствии фитоценотических связей гипоарктических таежно-болотных сообществ с центральноазиатско-степными и арктическими перигляциальными фитоценозами в среднем и позднем плейстоцене.

При рассмотрении долготных элементов флоры лиственничников (табл. 2) заметно, что доля циркумполярных растений, а также видов, произрастающих на азиатском и североамериканском континенте (восточносибирско-американских, сибирско-американских), в лесной флоре существенно уступает тундровой (табл. 3). Такое положение вещей соответствует тому, что в позднем плейстоцене на северо-востоке Азии были распространены безлесные пространства, флорогенетически близкие к нынешним тундрам, которые через «Берингийский сухопутный мост» активно обменивались видами растений с североамериканским континентом.

Таблица 2

Долготная структура лесного флористического комплекса Яно-Индибирского междуречья

Долготный элемент	Количество видов	Доля от общего количества видов, %
Циркумполярный	74	29,8
Евразийский	45	18,2
Восточносибирский	24	9,6
Восточносибирско-американский	9	3,6
Восточноевропейско-сибирский	1	0,4
Сибирский	53	21,7
Сибирско-американский	10	4,1
Восточносибирско-дальневосточный	14	5,7
Азиатско-американский	3	1,2
Азиатский	2	0,8
Северовосточно-азиатский	10	4,1
Северовосточно-азиатско-американский	2	0,8
Всего	247	100

Т а б л и ц а 3
Долготная структура флоры сосудистых растений
гипоарктической тундровой подзоны Яно-
Индибирского междуречья

Долготный элемент	Количество видов	Доля от общего количества видов, %
Циркумполярный	141	47,3
Евразийский	24	8,1
Востоносибирский	44	14,8
Востоносибирско-американский	31	10,5
Восточноевропейско-сибирский	3	0,9
Сибирский	31	10,5
Сибирско-американский	19	6,4
Арктический	1	0,3
Востоносибирско-дальневосточный	1	0,3
Сибирско-дальневосточный	2	0,6
Азиатский	1	0,3
Всего	298	100

Заметная роль евразийских, сибирских и восточносибирских видов – свидетельство достаточно заметной изоляции и активных процессов флорогенеза в лиственничных формациях в плейстоцене. При этом очень незначительна доля видов с азиатским ареалом. Как правило, это растения, связанные с центральноазиатскими степями, и наблюдающаяся картина – свидетельство того, что изоляционные процессы флор разных районов Евразии связаны не только с физическими преградами, но и с экологическими условиями. И если центральноазиатские флоры проявляют тенденции к термофильности, то североазиатские более холодовыносливы, и отбор действовал в этом направлении. Более заметное участие дальневосточных элементов в лесной флоре по сравнению с тундровой объясняется активным видообразовательным процессом в дальневосточных горных лесных ценозах, представители которых проникли во флору региона до плейстоцена.

Большинство видов лесного флористического комплекса, не имеющих трансконтинентального ареала, относятся к бореальному широтному элементу и семействам с активным видообразованием в высоких широтах (*Cyperaceae*, *Salicaceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Ranunculaceae*, *Violaceae*, *Scrophulariaceae*). Доля циркумбореальных видов в лесной флоре Яно-Индибирского междуречья составляет 14,2 % (35 видов). В темнохвойных лесах доля циркумбореальных видов составляет 67 % (37 видов) [8], что свидетельствует не только о древности, устойчивости и закрытости, но еще и о более широком распространении темнохвойных лесов на обоих континентах, как зонального типа

растительности в плейстоцене, в отличие от светлых таежных ценозов, формирование которых связано с плейстоценом.

Тот факт что, американские лиственницы *Larix laricina* и *L. alaskensis* морфологически очень сильно отличаются от сибирских лиственниц *Larix sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* [1], свидетельствует о том, что разрыв трансконтинентальных связей и независимое видообразование среди лиственниц происходило в самом начале плейстоцена и к тому времени ландшафты Берингии стали безлесными. В течение всего плейстоцена флорогенез в лесах Северо-Восточной Азии и Северной Америки проходил независимо друг от друга.

Заключение

В плейстоцене похолодание климата, сопровождавшееся почти повсеместным развитием сезонной (или многолетней) мерзлоты на северо-востоке Азии, привело к выпадению темнохвойной тайги с состава растительного покрова и распространению лиственничных редколесий. При этом в течение всего плейстоцена господствующим типом зональной растительности были травяные биомы, фитоценотическая структура которых является дискуссионным вопросом, несмотря на широкое принятие научным сообществом концепции тундростепей.

Что же касается лиственничных лесов, то широкое распространение они получили на границе плейстоцена–голоцена и являются в настоящее время таким же молодым зональным типом растительности как и тундры.

Открытая структура северотаежных лиственничных фитоценозов, довольно-таки пестрый состав флористических элементов отражают филогенетические процессы, происходившие в плейстоцене, когда в течение долгого исторического периода лесные сообщества представляли собой интразональный тип растительности, расширявшие свое присутствие в межледниковья и сокращавшие ареалы распространения в гляциалы. Филогенетическая эволюция северотаежных лиственничных лесов протекала независимо от филоценогенеза темнохвойной тайги. Объединяет эти два современных зональных лесных биомы только небольшая часть общих видов. Северотаежные лиственничники и генетически, и фитоценотически больше связаны с гипоарктическими тундрами, имея с ними общую эволюционную историю в течение всего плейстоцена и голоцена.

Литература

1. Бобров Е.Г. История и систематика лиственниц. – Л.: Наука, 1972. – 92 с.

2. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 144 с.

3. Толмачев А.И. Введение в географию растений – Л., 1974. – 244 с.

4. Флора Сибири. Т. 1–13. – Новосибирск: Наука, 1988–1997.

5. Флора Якутии: Географический и экологический аспекты / Л.В. Кузнецова и др. – Новосибирск: Наука, 2010. – 192 с.

6. Мальшев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск: Наука, 1984. – 264 с.

7. Николин Е.Г. Конспект флоры Верхоянского хребта. – Новосибирск: Наука, 2013. – 246 с.

8. Толмачев А.И. К истории возникновения и развития темнохвойной тайги. – М.; Л., 1954. – 117 с.

9. Юрцев Б.А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры. – М.; Л.: Наука, 1966. – 94 с.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 582.929.006(571.56)

Интродукционное испытание *Scutellaria baicalensis* Georgi (шлемника байкальского) в Якутском ботаническом саду

П.А. Павлова, П.С. Егорова

Якутский ботанический сад

Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Рассмотрены результаты интродукционного изучения *Scutellaria baicalensis* Georgi. Изучены ритмологическая, морфологическая изменчивость и онтогенез в культуре, оценены интродукционные возможности вида. В условиях культуры *S. baicalensis* проходит полный сезонный цикл развития. К болезням и вредителям вид устойчив. В культуре продолжительность онтогенетических состояний прегенеративного периода сокращается. Высокая интродукционная устойчивость *S. baicalensis* показывает перспективность плантационного выращивания для лекарственных целей и озеленения.

Ключевые слова: шлемник байкальский, ботанический сад, интродукция, фенологическое развитие, морфологическая изменчивость, онтогенез, онтогенетическое состояние, интродукционная устойчивость.

The article considers the results of the introduction study of *Scutellaria baicalensis* Georgi. The phenological, morphological variability and ontogenesis in culture are studied, introduction possibilities of the species are assessed. In the culture of *S. baicalensis* undergoes a complete seasonal cycle of development. The species is sustainable to diseases and pests. In the culture the duration of ontogenetic states of pregenerative period is reduced. High introductional sustainability of *S. baicalensis* shows the prospects of plantation cultivation for medicinal purposes and landscaping.

Key words: *Scutellaria baicalensis*, botanical garden, introduction, phenological development, morphological variability, ontogenesis, ontogenetic state, introduction resistance.

Введение

Scutellaria baicalensis – широко известное лекарственное растение. В научной медицине настойка корней применяется в качестве гипотензивного и седативного средства при гипертонической болезни 1-й и 2-й степени [1]. В китайской медицине применяется как смягчающее грудное и противоглистное средство, в тибетской – при пневмонии, миокардитах, сердечбиении, остром ревматизме и как жаропони-

жающее [2]. В последнее время выдвигается как гипотензивное средство, а также может применяться при лечении функциональных расстройств нервной системы [3]. Выявлены механизмы противоопухолевого действия экстракта шлемника байкальского, связанные с модуляцией защитных механизмов организма (увеличивает выработку цитокинов) [4].

Наряду с лекарственными свойствами, шлемник байкальский красиво и долго цветет, что дает возможность его применения в озеленении в качестве декоративного многолетника. Вид внесен в списки редких растений, статус редкости – 4-я категория [5].

ПАВЛОВА Полина Афанасьевна – н.с.; ЕГОРОВА Полина Спиридоновна – к.б.н., с.н.с., egorpolina@yandex.ru

2. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 144 с.

3. Толмачев А.И. Введение в географию растений – Л., 1974. – 244 с.

4. Флора Сибири. Т. 1–13. – Новосибирск: Наука, 1988–1997.

5. Флора Якутии: Географический и экологический аспекты / Л.В. Кузнецова и др. – Новосибирск: Наука, 2010. – 192 с.

6. Мальшев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск: Наука, 1984. – 264 с.

7. Николин Е.Г. Конспект флоры Верхоянского хребта. – Новосибирск: Наука, 2013. – 246 с.

8. Толмачев А.И. К истории возникновения и развития темнохвойной тайги. – М.; Л., 1954. – 117 с.

9. Юрцев Б.А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры. – М.; Л.: Наука, 1966. – 94 с.

Поступила в редакцию 07.07.2015

УДК 582.929.006(571.56)

Интродукционное испытание *Scutellaria baicalensis* Georgi (шлемника байкальского) в Якутском ботаническом саду

П.А. Павлова, П.С. Егорова

Якутский ботанический сад

Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Рассмотрены результаты интродукционного изучения Scutellaria baicalensis Georgi. Изучены ритмологическая, морфологическая изменчивость и онтогенез в культуре, оценены интродукционные возможности вида. В условиях культуры S. baicalensis проходит полный сезонный цикл развития. К болезням и вредителям вид устойчив. В культуре продолжительность онтогенетических состояний прегенеративного периода сокращается. Высокая интродукционная устойчивость S. baicalensis показывает перспективность плантационного выращивания для лекарственных целей и озеленения.

Ключевые слова: шлемник байкальский, ботанический сад, интродукция, фенологическое развитие, морфологическая изменчивость, онтогенез, онтогенетическое состояние, интродукционная устойчивость.

The article considers the results of the introduction study of Scutellaria baicalensis Georgi. The phenological, morphological variability and ontogenesis in culture are studied, introduction possibilities of the species are assessed. In the culture of S. baicalensis undergoes a complete seasonal cycle of development. The species is sustainable to diseases and pests. In the culture the duration of ontogenetic states of prerenative period is reduced. High introductional sustainability of S. baicalensis shows the prospects of plantation cultivation for medicinal purposes and landscaping.

Key words: *Scutellaria baicalensis*, botanical garden, introduction, phenological development, morphological variability, ontogenesis, ontogenetic state, introduction resistance.

Введение

Scutellaria baicalensis – широко известное лекарственное растение. В научной медицине настойка корней применяется в качестве гипотензивного и седативного средства при гипертонической болезни 1-й и 2-й степени [1]. В китайской медицине применяется как смягчающее грудное и противоглистное средство, в тибетской – при пневмонии, миокардитах, сердечной астме, остром ревматизме и как жаропони-

жающее [2]. В последнее время выдвигается как гипотензивное средство, а также может применяться при лечении функциональных расстройств нервной системы [3]. Выявлены механизмы противоопухолевого действия экстракта шлемника байкальского, связанные с модуляцией защитных механизмов организма (увеличивает выработку цитокинов) [4].

Наряду с лекарственными свойствами, шлемник байкальский красиво и долго цветет, что дает возможность его применения в озеленении в качестве декоративного многолетника. Вид внесен в списки редких растений, статус редкости – 4-я категория [5].

ПАВЛОВА Полина Афанасьевна – н.с.; ЕГОРОВА Полина Спиридоновна – к.б.н., с.н.с., egorpolina@yandex.ru

Распространен в Монголии, Китае, Японии, Восточной Сибири, на Дальнем Востоке: ареал вида охватывает северо-восточный Китай, северо-восточную часть территории Монгольской республики [6]. На территории России находятся 3 части ареала: северо-западный (восточнозбайкальский), северный (приамурский) и восточный (приморский). Отдельные фрагменты отмечены в Тункинской долине и по побережью оз. Байкал, у Иркутска по Ангаре [7]. В Якутии *Scutellaria baicalensis* наблюдается в бассейне р. Витим на границе с Иркутской областью [8]. Самые поздние сборы сделаны Кузнецовой Л.В. (из устного сообщения) в окрестностях г. Олекминск (вблизи аэропорта) на остепненном разнотравном лугу на южном открытом склоне. В составе сообщества были отмечены *Aster alpinus* L., *Dracocephalum ruischiana* L., *Astragalus danicus* Retz., *A. fruticosus* Pall., *Linum perenne* L., *Oxytropis candicans* (Pall.) DC., *Viola dactyloides* Schult., *Ephedra monosperma* С.А.Мей., *Hackelia deflexa* (Wahlenb.) Opiz.

Scutellaria baicalensis – горно-степное растение [9]. Растет по степям, редколесьям, сухим каменистым склонам. В Восточном Забайкалье вид приурочен к богато разнотравным настоящим и луговым степям, развитым на открытых южных склонах лесостепного пояса [10], а в Амурской области и Приморье на Дальнем Востоке – к степям и редколесьям [11].

Цель исследований – изучение онтогенеза и интродукционная оценка вида при культивировании в Якутском ботаническом саду.

Объекты и методика исследований. Работа выполнена в Якутском ботаническом саду ИБПК СО РАН в коллекционном питомнике природной флоры Якутии. Объектом изучения служили образцы *S. baicalensis*: а) выращенный из семян, собранных в 2006 г. в Алданском нагорье, б) выращенный из семян, полученных из ЦСБС (г. Новосибирск).

Фенологические наблюдения проведены по методике [12]. При описании жизненной формы и морфологии вида опирались на известные работы [13, 14]. Интродукционная устойчивость определена по шкале Н.С.Даниловой [15].

При изучении онтогенеза была принята концепция дискретного описания онтогенеза, предложенная Т.А.Работновым [16], его последователями [17]. При выделении фаз морфогенеза руководствовались методикой [17].

Результаты исследований и их обсуждение

По сравнению с другими интродуцентами вегетация *S. baicalensis* в Якутии начинается поздно, в конце мая, когда среднесуточная температура переходит через 10° С (по многолет-

ним данным в г. Якутске это происходит 25–30 мая). Особенностью этого периода являются значительные суточные амплитуды колебаний температуры. Кроме того, талая вода плохо впитывается почвой, поэтому растения развиваются в условиях физиологической засухи на еще холодных почвах.

Весеннее отрастание вида в зависимости от условий года отмечается в конце мая (табл.1). Примерно через месяц растения массово бутонизируют.

Таблица 1
Сезонный ритм развития *Scutellaria baicalensis* в культуре. 2006–2014 гг.

Фаза развития	В-Амга		ЦСБС	
	М ± m	V, %	М ± m	V, %
Отрастание	27.05±2,56	6,5	28.05±0,53	2,36
Массовая бутонизация	21.06± 1,24	2,5	19.06±3,73	7,50
Начало цветения	4.07±3,2	5,8	6.07±1,21	2,1
Массовое цветение	8.07±4,17	7,2	13.07±1,75	2,9
Конец цветения	17.08±6,83	8,9	19.08±1,16	1,5
Продолжительность цветения	82±1,92	8,6	83±1,72	9,0
Созревание семян	27.08±2,20	2,7	21.08±2,47	3,2
Интенсивность развития	41±2,4	3,6	46±2,7	3,8
Конец вегетации	11.09±0,90	6,5	11.09±1,0	0,82
Вегетационный период	105±1,84	4,5	104±2,7	3,7

В начале первой декады июля у растений отмечается начало цветения, а в конце декады – массовое цветение. Интенсивность развития вида составляет 41 день, продолжительность цветения – 82±1,92 дня. По срокам цветения *S. baicalensis* относится к летнецветущим растениям. Созревание семян происходит в конце августа – в начале сентября. Вегетационный период шлемника байкальского длится 105±1,84 дней.

Два изученных образца по данным сезонного развития почти не отличаются (табл.1). Также нет существенных различий у этих популяций по морфометрическим показателям (табл.2).

В условиях культуры *S. baicalensis* развивает ветвистые прямостоячие побеги высотой 29,2±1,16 см (табл.2). Боковые побеги в количестве 6,3±0,71 имеют высоту в среднем 16,2±0,77 см. Листья в числе 28,5±1,28 густо располагаются на стебле. Форма листьев овально-ланцетная, некоторые листья линейные, жестковатые, почти кожистые коротко опушенные, снизу точечно-железистые, на очень коротких черешках, цельнокрайние, со слегка завернутым вниз краем. Соцветие длиной 9,2±0,27, шириной 3,0±0,09 см, цветки обращены в одну сторону.

Т а б л и ц а 2

**Морфологические показатели
Scutellaria baicalensis. 2014 г.**

Морфометрические показатели	Образец 1	Образец 2
Высота побега, см	29,2 ± 1,16	27,4 ± 0,44
Число генеративных побегов, шт.	7,7 ± 1,23	3,2 ± 0,51
Число боковых побегов, шт.	6,3 ± 0,71	5,0 ± 1,06
Высота боковых побегов, см	16,2 ± 0,77	14,8 ± 1,06
Длина соцветия, см	9,2 ± 0,27	7,0 ± 0,27
Диаметр соцветия, см	3,0 ± 0,09	2,2 ± 0,12
Число цветков в соцветии, шт.	17,8 ± 0,80	13,4 ± 0,53
Длина 1 цветка, см	2,6 ± 0,03	-
Ширина 1 цветка, см	1,06 ± 0,02	-
Число листьев, шт.	28,5 ± 1,28	25,4 ± 0,40
Длина листа, см	3,7 ± 0,08	2,8 ± 0,06
Ширина листа, см	0,82 ± 0,06	0,4 ± 0,02

Количество цветков в соцветии в среднем доходит до 17,8±0,80 и они располагаются на верхушках ветвей. Длина одного цветка составляет 2,6±0,03, ширина – 1,06±0,02 см. Чашечка густоволосистая, сверху фиолетовая; венчик синий, снаружи густо-железистоопушенный, трубка коленчато-согнутая в нижней части. Орешки яйцевидные длиной 1,9–2,1, шириной 1,4–1,5 мм черные, на поверхности с мелкими шипиками. Масса 1000 семян составляет в среднем 1,9 г. Лабораторная всхожесть семян – 84 %. Размножение семенное. Ежегодно отмечается самосев. Устойчив к болезням и вредителям. Все это позволяет отнести *S. baicalensis* к высокоустойчивым в культуре растениям.

Благодаря длительному цветению и большому количеству цветков на одном растении (120–126 шт.) посевы шлемника байкальского очень декоративны и в течение 2–3 месяцев покрываются сплошным сине-фиолетовым ковром.

Онтогенез в питомнике изучался на растениях *S. baicalensis*, полученных от семян из ЦСБС (г. Новосибирск, 1991). В онтогенезе установлены три периода и семь онтогенетических состояний (латентный: семена; прегенеративный: проростки, ювенильные, имматурные, виргинильные; генеративный: молодые, средневозрастные, старые генеративные состояния). Постгенеративный период и субсенильное, сенильное онтогенетические состояния еще не наступили. Жизненная форма: стержнекорневой с многоглавым каудексом летнезеленый травянистый многолетник с удлиненными моноциклическими побегами.

Латентный период. Семена – продолговатокруглые, черные зремы с бугорчатой поверхностью, длиной около 2 мм, шириной 1–1,5 мм. Масса 1000 семян 1,8 г. Семена не имеют пери-

ода покоя, прорастают сразу после созревания, в культуре имеют высокую всхожесть. Возле кустов *S. baicalensis* всегда много самосева.

Прегенеративный период. Всходы при подзимнем посеве наблюдались в середине июня. Проростки невысокие, до 1–1,5 см. Семядоли округлые, на черешках. Первые листья цельные, узкие, появляются через 6–8 дней. Продолжительность фазы до 1–1,5 месяцев.

Ювенильные растения представлены невысоким, в 3,83±0,15 см первичным побегом с 5–6 парами узколанцетных, почти сидячих листьев. Семядоли отмирают. Корневая система состоит из нитевидного главного корня длиной до 7,85±0,7 см. Размеры листьев небольшие, 1,04±0,04 см в длину и 0,23±0,007 см в ширину. Продолжительность фазы от 2 недель до 1–2 мес.

В имматурном состоянии у растений начинается формирование каудекса, базальная часть главного корня утолщается и втягивается в почву. Длина главного корня составляет 13,2±0,41 см, диаметр его увеличивается до 1,45±0,10 мм. Главный побег достигает высоты 7,3±0,24 см, число листьев увеличивается до 9–10 шт. В имматурном состоянии растения пребывали до конца первого вегетационного сезона.

Следующей весной растения отрастали в конце мая. В виргинильном состоянии растения представляют собой рыхлый куст из 1–3 побегов до 14,0±0,89 см высотой. Побеги неветвистые. Количество листьев больше, до 14,6±1,09, они крупнее, длиной 1,7±0,07 см и шириной 0,4±0,008 см. У виргинильных растений диаметр базальной части главного корня достигает 2,5±0,10 мм, его длина – 24,7±0,36 см. В конце июля у развитых растений начинается бутонизация, в середине августа – первое цветение.

Молодое генеративное состояние. В первый год цветения у растений развиваются небольшие, 3,84±0,21 см соцветия из 3–5 метамеров. Цветки несколько мельче, чем у взрослых особей. Побеги генеративных растений выше, до 19,7±0,62 см. Листья немного крупнее, чем у виргинильных растений, 2,2±0,06 см в длину и 0,47±0,02 см в ширину, нижние листья к цветению засыхают. Главный корень продолжает разрастаться в ширину, в базальной части его диаметр составляет 3,5±0,002 мм.

В третий год вегетации растения развивают по 2 генеративных разветвленных побега высотой 15,06±0,88 см, высота соцветий увеличивается до 9,0±0,17 см, число метамеров соцветия до 7,1±0,25 шт. Главные соцветия простые, без паракладий. Каждый побег разветвлен в нижней части, несет до 3–6 пар боковых побегов высотой 11,4±1,11 см. Некоторые из них генеративные, соцветия боковых побегов также простые.

Каудекс имеет две главы, его диаметр увеличивается до $8,6 \pm 0,005$ мм, некрозов и разрушений в нем не наблюдается.

Средневозрастное генеративное состояние. Рыхлый куст *S. baicalensis* в данной фазе развития состоит из 5–10 генеративных побегов. Генеративные побеги мощные, общая средняя высота их составляет $34,1 \pm 0,72$ см. Соцветие в этом состоянии представляет собой кисть из открытых тирсов, т.к. соцветия имеют по 2–3 пары паракладий. Общая высота соцветия составляет $13,4 \pm 0,60$ см. Высота основного соцветия достигает $10,8 \pm 0,46$, а соцветия паракладий – $5,3 \pm 0,15$ см. Боковые побеги в числе 2–3, также несут соцветия высотой до $9,4 \pm 0,50$ см. У наиболее мощных боковых побегов соцветия также имеют паракладии. Подземная часть растений состоит из стержневого корня длиной $28,0 \pm 0,62$ см и многоглавого каудекса шириной 2–2,5 см. В средней части каудекса образуются проплешины. Продолжительность состояния 7–10 лет. Посаженные на постоянное место в 2006 г., перешедшие на следующий год в генеративное состояние растения и по настоящее время растут, не проявляя признаков старения.

В питомнике только одно растение можно отнести к старому генеративному состоянию. У этого растения побеги развиваются только из крайних глав каудекса. Побеги слабые, соцветия короткие, простые, без паракладий. Оно имеет довольно широкий (3·5 см) каудекс, в средней части почти весь разрушенный.

Заключение

В условиях питомника *S. baicalensis* проходит полный сезонный цикл развития, долго и красиво цветет. Продолжительность цветения составляет $82 \pm 1,92$ дня, а всего вегетационного периода – $105 \pm 1,84$ дня. Размножение в культуре семенное. К болезням и вредителям вид устойчив. В интродукционном испытании вид высокоустойчив.

В условиях культуры продолжительность онтогенетических состояний прегенеративного периода существенно сокращается. В период становления жизненной формы наблюдаются следующие фазы морфогенеза: первичный побег – p1, j; первичный куст – im; рыхлый куст – v, g¹, g², g³. Жизненная форма: стержнекорневой с многоглавым каудексом многолетник с удлиненными моноциклическими побегами. Общая продолжительность онтогенеза *S. baicalensis* в культуре составляет 10–15 лет.

Литература

1. *Машковский М.Д.* Лекарственные средства: В 2-х т., изд. 8-е. – М., 1977. – Т.1. – 624 с.
2. *Вайдурья – Онбо.* Трактат индотибетской медицины. – 1984. – 116 с.
3. *Минаева В.Г.* Лекарственные растения Сибири. – Новосибирск: Наука, 1991. – 431 с.
4. *Капля О.А.* Механизмы влияния экстракта шлемника байкальского на состояние системы естественной цитотоксичности при опухолевом росте: Дис. ... к.м.н. – Томск, 2004. – 156 с.
5. *Красная книга Республики Саха (Якутия).* Т.1. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. – Якутск: НИПК «Сахаполиграфиздат», 2000. – 208 с.
6. *Хайдав Ц., Меньшикова Т.А.* Лекарственные растения в монгольской медицине. – Улан-Батор, 1978. – 191 с.
7. *Бухашеева Е.Г., Асеева Т.А.* Шлемник байкальский в Восточном Забайкалье // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: Тезисы докладов 1 Межд. науч.-практ. конф. (26–28 ноября 2002 г., Барнаул). – Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2003. – С. 80.
8. *Караваев М.Н.* Конспект флоры Якутии. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. – 189 с.
9. *Мальшев Л.И., Пешкова Г.А.* Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск: Наука, 1984. – 264 с.
10. *Санданов Д.В.* Оценка состояния ценопопуляций восточноазиатских видов растений в различных частях ареала // Растительный мир Азиатской России. – 2010. – № 2 (6). – С. 80–87.
11. *Банаева Ю.А.* Онтогенез шлемника байкальского // Онтогенетический атлас лекарственных растений. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2000. – С. 180–185.
12. *Бейдеман И.Н.* Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ. – Новосибирск: Наука, 1974. – 156 с.
13. *Серебряков И.Г.* Жизненные формы высших растений и их изучение // Полевая геоботаника. Т.3. – М.; Л.: Наука, 1964. – С. 146–208.
14. *Жмылев П.Ю., Алексеев Ю.Е., Карпухина Е.А., Баландин С.А.* Биоморфология растений: Иллюстрированный словарь. – М., 2002. – 240 с.
15. *Данилова Н.С.* Интродукция многолетних травянистых растений флоры Якутии. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1993. – 164 с.
16. *Работнов Т.А.* Методы определения возраста и длительности жизни у травянистых растений // Полевая геоботаника. Т.2. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 249–262.
17. *Ценопопуляции растений: основные понятия и структура.* – М.: Наука, 1976. – 214 с.

Поступила в редакцию 28.04.2015

Аномалии у рогозов Дальнего Востока России и Вьетнама

А.Н. Краснова

Институт биологии внутренних вод РАН, пос. Борок Ярославская обл.

В нарушенных местообитаниях на территории Дальнего Востока России и Вьетнама в популяциях рогоза восточного *T. orientalis* C. Presl sensu amplo, рогоза господствующего *T. domingensis* Pers., рогоза Комарова *T. komarovii* A. Krasnova обнаружены морфологические аномалии — полимеризация, истинная и ложная «ветвистость». Это свидетельствует об изменениях гидрофильной флоры под влиянием антропогенного фактора.

Ключевые слова: аномалия, полимеризация, «ветвистость», антропогенный фактор, рогоз, *Typha orientalis* C. Presl sensu amplo, *Typha domingensis* Pers., *Typha komarovii* A. Krasnova.

In the broken localities of the terrain of the Far East of Russia and Vietnam in populations of east cat's-tail *Typha orientalis* C. Presl sensu amplo., cat's-tail overtopping *T. domingensis* Pers., cat's-tail Komarova *T. komarovii* A. Krasnova some morphological anomalies as polymerization, true and false «branchiness» are found. It testifies to radical changes of hydrophilic flora under the influence of an anthropogenic factor.

Key words: anomaly, polymerization, «branchiness», anthropogenic factor, hemerobia, cat's-tail, *Typha orientalis* C. Presl sensu amplo, *Typha domingensis* Pers., *Typha komarovii* A. Krasnova.

Введение

Проблемы изменений окружающей среды под влиянием антропогенного фактора приобретают все большую актуальность. Антропогенные воздействия на водные и прибрежно-водные экотопы, будучи первоначально локальными, со временем распространяются на всю акваторию. Гидрофильная флора в этом отношении очень уязвима, поэтому раньше других эколого-флористических комплексов оказалась измененной. Это в свою очередь приводит к синантропизации гидрофильных сообществ, где происходит эцезис агрессивных видов даже из рода рогоз *Typha* L. [1–4]. Однако синантропизация растительного покрова имеет и эволюционные последствия. Это и уменьшение генетического разнообразия, и расширение площадей вторичных экотопов, обуславливающих интродуктивную гибридизацию видов. Только преобладание в составе широкоареальных эвритопных видов с большими преадаптационными возможностями создавало «видимую» устойчивость гидрофильных сообществ в гидрофильных экосистемах XX века [5]. В связи с этим исследование влияния антропогенного фактора на микроэволюционные процессы в условиях техногенной среды требует углубленного изучения [1, 6]. Из всего многообразия реакций растений на воздействие факторов среды, в том чис-

ле антропогенных, появление различных аномалий (терат) редко учитывается и сравнительно слабо изучено. В настоящее время тератология растений, несмотря на длительную историю развития, снова привлекает внимание исследователей. Явление тератогенеза приобретает все большие масштабы. Изучение тератологической изменчивости как составной части морфологической изменчивости, как одного из многообразных процессов видообразования, имеет научное и практическое значение [7].

Цель работы – выявить элементарные аномалии (тератоморфы) у рогозов с территории российского Дальнего Востока и Вьетнама.

Материал и методы

Материалом для анализа аномалий в роде *Typha* L. с территории Дальнего Востока России и Вьетнама послужили данные собственных полевых исследований, гербарий аномальных растений рогозов, собранный в Вологодской (1984–2008) [8] и Ярославской областях (2004–2013) [9]. Просмотренные коллекции по роду *Typha* в Гербариях LE,! (БИН, Санкт-Петербург, Россия) и KW,! (Институт ботаники НАН Украины, Киев). Использованы полевые материалы сотрудников темы «ЭКОЛАН 3.2» Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра (г. Нячанг). Классификацию элементарных морфологических аномалий проводили согласно Ал. А. Федорова [10].

Результаты и их обсуждение

В ботанической литературе о рогозе восточном *Typha orientalis* C. Presl очень мало сведений. Описан К. Преслем (C. Presl) с Филиппинских о-вов; *typus*: Insula Zebu Philippinarum: Cumming № 1767 (G). Относится к секции *Typha* подсекции *Komaroviae* A. Krasnova [11]. Растет по стоячим и медленно текущим водам, по болотам. Встречается в Зее-Буреинском, Уссурийском районах. На общее распространение японо-китайско-австралийско-го вида на территории Сибири и Дальнего Востока указывали Н.Н. Цвелёв [3], В.Л. Комаров [12], Б.А. Федченко [13], В.Н.Ворошилов [14], А.Е. Кожевников и Н.С. Пробатова [Флора российского Дальнего Востока: Дополнения и изменения ..., 15], А.Н. Краснова [16].

В 1987 г. автор, исследуя рогозы родства *Typha latifolia* в Гербариях бывшего СССР, описала с территории Дальнего Востока рогоз Комарова *T. komarovii* [11]. Этот вид отличается от рогоза восточного *T. orientalis* округло-утолщенной с нижней стороны листовой пластинкой стеблевых листьев, продолговато-обратнояйцевидным или продолговато-эллиптическим женским пестичным початком светло-коричневого цвета. По форме пестичного початка и пучкам бесплодных пестичных цветков, волоскам околоцветника, не достигающим рыльца, рогоз Комарова ближе к рогозу Лаксмана *T. laxmannii* Leresch. Однако отсутствие промежутка между тычиночным и пестичным початками «роднит» его с *T. orientalis*. Типовым материалом служили сборы А. Исайкиной: Дальний Восток, Приморский край, Анучинский р-н, окр. ст. Варваровки, 28.07.1977 г. (рис. 1, а).

Её сборы интересны ещё и тем, что среди нормальных растений автором была отмечена аномалия ложная «ветвистость» или расщепление оси соцветия (рис. 1. б). Обнаружение этой аномалии в популяции *T. komarovii* показало, что изменение видового состава в гидрофильной флоре Дальнего Востока России произошло давно. По-видимому, это следствие плейстоценовой миграции в северные районы и его трансформации в разных геологических периодах кайнозойской эры. Однако известно также, что до середины 1980 г. антропогенная нагрузка на водные ресурсы России нарастала, и загрязнение их росло. Особенно интенсивному загрязнению подверглись все типы рек и водоемов [5], что, по-видимому, вызвало также активное появление аномалий среди рогозов в Евразии. Особенно это проявилось среди представителей бесприцветниковых рогозов, ареал которых в большинстве расположен в пределах бывшего СССР [8, 9, 17, 18] (рис. 1, в). Антропогенный фактор ускорил процессы трансформации в природных гидрофильных сообществах водных экосистем России и Дальнего Востока, которые были известны с миоцен-плиоценового периода. Этот период активного распада палеогеновых (третичных) гидрофильных сообществ характеризуют периодом «медленной» эволюции [7]. Т.е. типичный рогоз восточный, по-видимому, на Дальнем Востоке России претерпел многочисленные трансформации. Современное цитирование его для этой территории сомнительно, поскольку не выяснена систематика.

В этом отношении были интересными аномалии рогозов с территории Вьетнама – оз. Баушен (Bàu Sen), провинция Биньтхуан (Bình Thuận) и безымянного озера полуострова Камрань, провинция Кханьхоа (Khánh Hòa). В 2014 г. в прибрежьях оз. Баушен В.А. Гусаковым, Е.Г. Пряничниковой, С. М. Ждановой собрана аномалия истинная «ветвистость» *T. orientalis* (рис. 2, а). Аномалия, как и ложная ветвистость, характерна для соцветий типа початок. Однако при истинной ветвистости затронуты не осевые структуры, а непосредственно цветоложе. Все аномалии ветвистости рассматривались как реверсии на основе скрытых наследственных признаков [6, 10]. В прибрежье небольшого безымянного озера на берегу морского залива полуострова Камрань этими сотрудниками в 2014 г. обнаружена аномалия полимеризация (увеличение числа органов) *T. domingensis* Pers. Для территории Вьетнама аномалия у *T. domingensis* приводится впервые, как, впрочем, и сам вид (рис. 2).

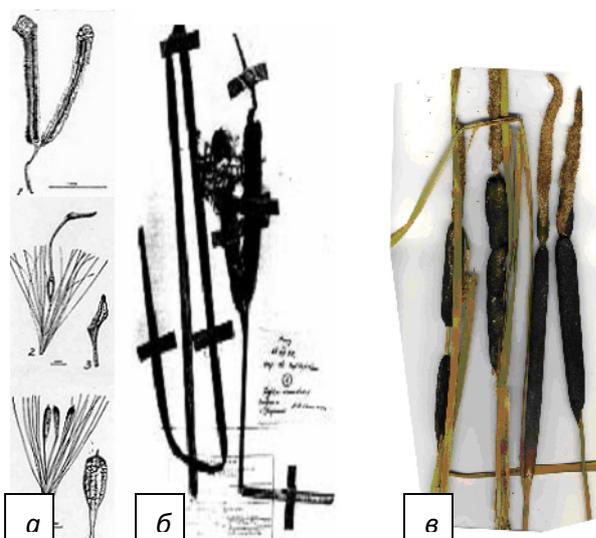


Рис. 1. *Typha komarovii* A. Krasnova: а – цветки; б – аномалия ложная «ветвистость»; в – аномалия полимеризация *T. latifolia* L. [11]



Рис. 2. Аномалии у рогозов Вьетнама:

а – истинная «ветвистость», рогоз восточный *Typha orientalis* C. Presl sensu amplo. Вьетнам, оз. Баушен (Bàu Sen), провинция Биньтхуан (Bình Thuận), 23 марта, 2014 г., В.А. Гусаков, Е.Г. Пряничникова, С. М. Жданова; координаты N 11°04.708', E 108°23.892', 23; б – аномалия полимеризация *T. domingensis* Pers. Вьетнам, безымянное озеро, провинция Кханьхоа (Khánh Hòa), полуостров Камрань (Cam Ranh), 17 марта, 2014 г., они же; координаты N 11°58.925', E 109°12.709'; в – нормальный экземпляр *T. domingensis* Pers. Вьетнам, там же, они же.

Заклучение

Эволюционные процессы в роде рогоз *Typha* L. происходили в голоцене на фоне антропогенного фактора, который отечественные эволюционисты характеризовали как великую геологическую силу [19–21]. В результате разорвались ареалы у многих полиморфных гидрофильных видов, в том числе и у видов рода *Typha*. Сократилась их численность в природных популяциях, понизилась фитоценотическая активность в экосистемах. В локальных, изолированных популяциях рогозов замедлились процессы межпопуляционной изменчивости. Выросли внутривидовые изменения. Эти процессы протекали быстро, создавая противоречия между наследственными типовыми, или родовыми морфологическими признаками и возникшими изменениями. В современных популяциях рода рогоз *Typha* L. отмечается массовое появление элементарных морфологических аномалий, которые способствуют нарушениям репродуктивной целостности вида, изменяя роль в использовании абиотических факторов [16–18]. Несомненно, что российским дальневосточным и вьетнамским популяциям рогозов *T. komarovii*, *T. laxmannii*, *T. domingensis*, *T. orientalis* и другим эти процессы присущи, а проис-

ходящие изменения носят другой характер эволюции – антропогенный.

Работа выполнена в рамках темы «ЭКОЛАН 3.2» Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра. Авторы глубоко признательны российским и вьетнамским коллегам, администрации и техперсоналу Приморского отделения тропического центра (г. Нячанг) за помощь в организации и выполнении полевой части исследований.

Литература

1. Бурда Р.И. Антропогенная трансформация флоры. – Киев: Наукова думка. – 1991. – 168 с.
2. Тохтарь В.К. Флоры техногенных экотопов: Автореф. дис. ... д.б.н. – Киев, 2005. – 21 с.
3. Цвелев Н.Н. Typhoideae // Сосудистые растения советского Дальнего Востока. – СПб.: Наука, 1996. – Т.8. – С. 355–357.
4. Ciotir, H.Kirk, R.Row, Freeland J.R. Intercontinental dispersal of *Typha angustifolia* and *T. latifolia* between Europe and North America has implications for *Typha* invasions // Biol. Invasions. – 2013. – V.15. – P.1377–1390. The online version of this article Doi: 10.1007/s110530-012-0377-8.
5. Коронкевич Н.И., Черногаева Г.М., Зайцева И.С., Зеленев А.С. Загрязнение природных вод на территории России // Изменение природной среды России в XX веке. – М.: Молнет, 2012. – С. 188–201.
6. Тахтаджян А.Л. Грани эволюции. – СПб.: Наука, 2007. – 326 с.
7. Агаев М.Г. О многообразии видообразовательных процессов // Ботанический журнал. – 1968. – Т.53, № 1. – С. 23–33.
8. Краснова А.Н. Тератоморфы рогоза широколистного *Typha latifolia* L. озера Воже // Биология внутренних вод. – 2010. – Т.3, № 4. – С. 39–44.
9. Краснова А.Н. Тип тератогенеза – экспансивное видообразование в гидрофильном роде рогоз *Typha* L. // Любичевские чтения, 2014. Проблемы эволюции и экологии: Сб. материалов Межд. конф. (7–9 апреля 2014 г., Ульяновск). – Ульяновск: УлГПУ, 2014. – С. 94–101.
10. Федоров Ал. А. Тератология и формообразование у растений. Доложено на 10-м ежегодном Комаровском чтении 7 декабря 1958 г. –М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. – 28 с.
11. Краснова А.Н. К систематике рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) на территории СССР // Фауна и биология пресноводных организмов. – Л.: Наука, 1987. – С. 43–59.
12. Комаров В.Л. Род *Typha* L. // Флора Маньчжурии: Труды Петербургского ботанического сада. – СПб., 1901. – Т.1. – С. 559.
13. Федченко Б.А. Рогозовые // Флора СССР. – М.; Л.: АН СССР, 1934. – Т. 1. – С. 210–216.

14. Ворошилов В.Н. *Typha* L. // Определитель растений советского Дальнего Востока. – М.: Наука, 1982. – С. 36.
15. Флора российского Дальнего Востока: Дополнения и изменения к изданию «Сосудистые растения советского Дальнего Востока», т. 1–8 (1985–1996 гг.) / Кол. авторов; отв. ред. А.Е. Кожевников и Н.С. Пробатова. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 456 с.
16. Краснова А.Н. Структура гидрофильной флоры техногенно трансформированных водоёмов Северо-Двинской водной системы. – Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати», 1999. – 200 с.
17. Краснова А.Н., Кузьмичев А.И. Тераты (морфологические аномалии) в роде розог *Typha* L. // Биология внутренних вод. – 2005. – № 2. – С. 7–11.
18. Краснова А.Н. Тератоморфы рогоза широколистного *Typha latifolia* L. // Актуальные проблемы экологии Ярославской области: Материалы Четвертой науч.-прак. конф. – Ярославль, 2008. – С. 144–148.
19. Завадский К.М. Вид и видообразование. – Л.: Наука, 1968. – 404 с.
20. Завадский К.М., Колчинский Э.И. Эволюция эволюции: Историко-критические очерки проблемы. – Л.: Наука, 1977. – 237 с.
21. Создатели современного эволюционного синтеза: Коллективная монография / Отв. ред.-сост. Э.И. Колчинский. – СПб.: Нестор-История, – 2012. – 996 с.

Поступила в редакцию 10.06.2015

УДК 595.771

Места выплода и сезонный ход численности комаров (Diptera, Culicidae) в Оймяконском районе Якутии

А.И. Барашкова, А.Д. Решетников

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, г. Якутск

В лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии во второй декаде июня лед в постоянных водоёмах оттаивает только по краям, в них встречаются только единичные личинки комаров. Во временных водоёмах плотность личинок комаров во второй декаде июня насчитывается от 3 до 955 экз./м². В начале третьей декады июня плотность личинок достигает 1720 экз./м². В конце июня отмечается спад плотности личинок комаров от 13 до 363 экз./м² и одновременное увеличение куколок до 60 % от общего числа. Спад уровня воды у таких водоёмов идет медленно, что обеспечивается мерзлотным режимом почв. Водоёмы сохраняются до конца июля. Видовой состав вылетающих из садка имаго определен как *Aedes punctator Kirby* и *A. hexodontus Dyar*. Доля вылета из личинок – 95 %. В 2004 г. в лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии лёт отмечался с 3 июня до 7 сентября с общей продолжительностью периода активности имаго 97 дней. Пик лёта и нападения самок комаров на домашних северных оленей зарегистрирован с 3 до 23 июля. В период пика численности за 5-минутный учет сачком отлавливается более 5000–9000 особей комаров у приманочного оленя. Из крупных сельскохозяйственных животных наиболее привлекательным объектом для нападения самок комаров является домашний северный олень.

Ключевые слова: кровососущие комары, экология, личинки, имаго, биотопы, лёт.

In the forest-tundra zone of North-Eastern Yakutia in the second decade of June the ice in constant reservoirs thaws only at the edges where only single larvae of mosquitoes are present. In temporary water bodies, in the second decade of June the density of larvae reaches from 3 to 955 specimens/m². At the beginning of the third decade of June it increase up to 1720 specimens/m². At the end of June there is a decline of mosquito larvae density from 13 to 363 specimens/m², and at the same time the increase of the pupae up to 60% of the total. Recession of water level of such reservoirs goes slowly because of the permafrost regime of the soils. The reservoirs exist until the end of July. The species of the imagos flying out of a cage is defined as

БАРАШКОВА Анастасия Ивановна – к.б.н., с.н.с., unisx@mail.ru; РЕШЕТНИКОВ Александр Дмитриевич – д.вет.н., проф., unisx@mail.ru.

14. Ворошилов В.Н. *Typha* L. // Определитель растений советского Дальнего Востока. – М.: Наука, 1982. – С. 36.
15. Флора российского Дальнего Востока: Дополнения и изменения к изданию «Сосудистые растения советского Дальнего Востока», т. 1–8 (1985–1996 гг.) / Кол. авторов; отв. ред. А.Е. Кожевников и Н.С. Пробатова. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 456 с.
16. Краснова А.Н. Структура гидрофильной флоры техногенно трансформированных водоёмов Северо-Двинской водной системы. – Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати», 1999. – 200 с.
17. Краснова А.Н., Кузьмичев А.И. Тераты (морфологические аномалии) в роде рогоз *Typha* L. // Биология внутренних вод. – 2005. – № 2. – С. 7–11.
18. Краснова А.Н. Тератоморфы рогоза широколистного *Typha latifolia* L. // Актуальные проблемы экологии Ярославской области: Материалы Четвертой науч.-прак. конф. – Ярославль, 2008. – С. 144–148.
19. Завадский К.М. Вид и видообразование. – Л.: Наука, 1968. – 404 с.
20. Завадский К.М., Колчинский Э.И. Эволюция эволюции: Историко-критические очерки проблемы. – Л.: Наука, 1977. – 237 с.
21. Создатели современного эволюционного синтеза: Коллективная монография / Отв. ред.-сост. Э.И. Колчинский. – СПб.: Нестор-История, – 2012. – 996 с.

Поступила в редакцию 10.06.2015

УДК 595.771

Места выплода и сезонный ход численности комаров (Diptera, Culicidae) в Оймяконском районе Якутии

А.И. Барашкова, А.Д. Решетников

Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, г. Якутск

В лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии во второй декаде июня лед в постоянных водоёмах оттаивает только по краям, в них встречаются только единичные личинки комаров. Во временных водоёмах плотность личинок комаров во второй декаде июня насчитывается от 3 до 955 экз./м². В начале третьей декады июня плотность личинок достигает 1720 экз./м². В конце июня отмечается спад плотности личинок комаров от 13 до 363 экз./м² и одновременное увеличение куколок до 60 % от общего числа. Спад уровня воды у таких водоёмов идет медленно, что обеспечивается мерзлотным режимом почв. Водоемы сохраняются до конца июля. Видовой состав вылетающих из садка имаго определен как *Aedes punctator* Kirby и *A. hexodontus* Dyar. Доля вылета из личинок – 95 %. В 2004 г. в лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии лёт отмечался с 3 июня до 7 сентября с общей продолжительностью периода активности имаго 97 дней. Пик лёта и нападения самок комаров на домашних северных оленей зарегистрирован с 3 до 23 июля. В период пика численности за 5-минутный учет сачком отлавливается более 5000–9000 особей комаров у приманочного оленя. Из крупных сельскохозяйственных животных наиболее привлекательным объектом для нападения самок комаров является домашний северный олень.

Ключевые слова: кровососущие комары, экология, личинки, имаго, биотопы, лёт.

In the forest-tundra zone of North-Eastern Yakutia in the second decade of June the ice in constant reservoirs thaws only at the edges where only single larvae of mosquitoes are present. In temporary water bodies, in the second decade of June the density of larvae reaches from 3 to 955 specimens/m². At the beginning of the third decade of June it increase up to 1720 specimens/m². At the end of June there is a decline of mosquito larvae density from 13 to 363 specimens/m², and at the same time the increase of the pupae up to 60% of the total. Recession of water level of such reservoirs goes slowly because of the permafrost regime of the soils. The reservoirs exist until the end of July. The species of the imagos flying out of a cage is defined as

БАРАШКОВА Анастасия Ивановна – к.б.н., с.н.с., unisx@mail.ru; РЕШЕТНИКОВ Александр Дмитриевич – д.вет.н., проф., unisx@mail.ru.

Aedes punctor Kirby and A. hexodontus Dyar. The larvae survival was 95%. In 2004 in the forest-tundra zone of Northeastern Yakutia the flight was observed from June 3rd to September 7th with 97 days of the period of activity of the imago. The peak of flight and attacks of female mosquitoes on domesticated reindeer was registered from 3 to 23 July. At the peak period in 5-minute account by a net it was caught more than 5,000-9,000 mosquitoes by a bait deer. From large farm animals the most attractive object for attack of females of mosquitoes is the domestic reindeer.

Key words: mosquitoes, ecology, larvae, imago, biotopes, flight.

Введение

Кровососущие комары широко распространены по всему земному шару [1–3]. Север Сибири и Якутии не являются исключением [4–12], где из компонентов гнуса наиболее многочисленным семейством являются комары, достигающие самой высокой численности по сравнению с другими зонами России. Вредоносное значение этих насекомых как эктопаразитов обусловлено сильным беспокойством за счет механического раздражения и болевых ощущений при проколе кожи и введении в ранку слюны, потерями крови и общей интоксикацией организма. При массовом нападении гнуса снижается производительность труда людей, падает продуктивность животных, увеличивается травматизм. Присутствие гнуса часто делает невозможным пребывание людей и проведение работ в открытой природе, а также выпас животных. Недостаточность изученности экологии комаров в обширной северо-восточной зоне Якутии явилась основанием для проведения наших исследований.

Материалы и методы исследования

Изучение эколого-фенологических закономерностей преимагинальных фаз комаров проводили в Оймяконском районе северо-восточной зоны Якутии в 2004 г. Местом наблюдений был выбран участок редкостойных северных лиственничных лесов, характерных для зоны. Леса почти везде чередуются с болотами. Почвы мерзлотно-палевые или заболоченные, с неглубоким залеганием многолетней мерзлоты. По пологим склонам растут мохово-лишайниковые леса, а на более пониженных местах они сменяются мохово-разнотравно-осоковым редколесьем. Водоёмы участка были закартированы. Площади биотопов и водоёмы определены при помощи деревянного циркуля с шагом на 2 м, учтены глубина, цвет, температура воды, скорость водотока, характер грунта водоёма. Наблюдения вели один раз в неделю. При учете плотности личинок комаров применяли биоценометр круглого сечения площадью 1/13,25 м² (диаметром 31 см) [13]. Личинок вычерпывали сачком, подсчитывали, брали пробы или выпускали обратно. Преимагинальные фазы комаров фиксировали в 70 %-м этиловом спир-

те, флаконы снабжали этикетками. Пробы личинок подсаживали в садки-ванночки для получения имаго. Ванночки снабжены проволочным каркасом над зеркалом воды, обтянутым марлей для улавливания вылетающих окрыленных особей.

С целью изучения сезонных изменений численности учёты нападающих комаров проводили с помощью энтомологического сачка со съёмными мешочками [14] в часы наибольшей активности кровососущих двукрылых насекомых два раза в декаду в 5–6 и 19–21 ч. Один учет представлял собой 10 взмахов («восьмеркой») в 10 повторностях, что соответствует 5-минутному учету на животных [15]. В качестве приманочных животных при одномоментном учёте численности использованы олени и лошади.

Результаты и обсуждение

При маршрутных исследованиях окрестностей по традиционным путям калаша (кочёвок) оленеводческих стад обследовали биотопы комаров. Высокогорная лесотундра представляет собой лиственничное редколесье, чередующееся болотами и постоянными озерами. Угодья суходольного типа почти отсутствуют, все они относятся к категории мокрых лугов, т.е. представляют собой сплошной водоём, во влагообеспечении которого большую роль играют подземные льды и воды, скованные вечной мерзлотой. У таких водоёмов глубина достигает не более 10–20 см, площадь зеркала воды большая, температура поверхностных слоев воды прогревается до 17–19 °С. Дно водоёмов часто покрыто сплошным мхом, подводная поверхность которого усеяна пузырьками воздуха. В таких водоёмах наблюдается большая плотность личинок комаров. Постоянные водоёмы во второй декаде июня оттаивают только по краям, на 1/3 покрыты льдом, температура воды 0–1 °С. В таких постоянных водоёмах встречаются только единичные личинки. Во временных же водоёмах плотность личинок комаров во второй декаде июня насчитывается от 3 до 955 экз./м². В начале третьей декады июня плотность личинок достигает 1720 экз./м². В конце июня отмечали спад плотности личинок комаров от 13 до 363 экз./м² и одновременное увеличение куколок до 60 % от общего числа. Спад уровня воды у та-

ких водоёмов идет медленно, что обеспечивает мерзлотным режимом почв. Водоёмы сохраняются до конца июля. Видовой состав вылетающих из садка имаго определен как *Aedes punctor* Kirby и *A. hexodontus* Dyar. Доля вылета из куколок – 95%.

Погодные условия были характерными для климатической зоны. Первых комаров в природе отметили 3 июня в солнечный день при температуре воздуха 15,0 °С, относительной влажности 48 % и скорости ветра до 1,0 м/с. В этот день на животное за учетное время нападало не более 10 особей. С 22 июня началось похолодание (до 1,0 °С) с ветреной погодой (до 3–8 м/с), при этом лёта комаров не отмечали. Вновь лёта комаров зарегистрирован только 3 июля при солнечной погоде (25–30 °С) с нарастанием численности комаров. В период пика численности за 5-минутный учет сачком отлавливается более 5000–9000 особей комаров у приманочного оленя (у приманочной лошади этот показатель не превышает 500 экз.). В первой декаде августа отмечались кратковременные дожди, в отдельные дни температура поднималась до 23–28 °С. Во второй декаде августа резко сократился лёта комаров, ночные температуры снизились до 1–6 °С, дневные – до 10–15 °С. В третьей декаде августа отмечались ночные заморозки (0...–5 °С), днем – единичный лёта комаров. В первых числах сентября отмечено наступление ветреной (до 6 м/с) и дождливой погоды, что повлекло за собой прекращение активности комаров. В сезон 2004 г. общая продолжительность периода лёта комаров по дате появления первых особей и отлова последних составила 97 дней.

Правильность определения видового состава комаров подтверждена с.н.с., к.б.н. Н.К. Потаповой, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск.

Выводы

1. В лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии во второй декаде июня лед в постоянных водоёмах оттаивает только по краям, в них встречаются только единичные личинки комаров.

2. Во временных водоёмах плотность личинок комаров во второй декаде июня насчитывается от 3 до 955 экз./м². В начале третьей декады июня плотность личинок достигает 1720 экз./м². В конце июня отмечается спад плотности личинок комаров от 13 до 363 экз./м² и одновременное увеличение куколок до 60 % от общего числа.

3. Спад уровня воды у таких водоёмов идет медленно, что обеспечивается мерзлотным режимом почв. Водоёмы сохраняются до конца

июля. Видовой состав вылетающих из садка имаго определен как *Aedes punctor* Kirby и *A. hexodontus* Dyar. Доля вылета из личинок – 95 %.

4. В 2004 г. в лесотундровой зоне Северо-Востока Якутии лёта отмечался с 3 июня до 7 сентября с общей продолжительностью периода активности имаго 97 дней. Пик лёта и нападения самок комаров на домашних северных оленей зарегистрирован с 3 до 23 июля. В период пика численности за 5-минутный учет сачком отлавливается более 5000–9000 особей комаров у приманочного оленя.

5. Из крупных сельскохозяйственных животных наиболее привлекательным объектом для нападения самок комаров является домашний северный олень.

Литература

1. *Dario Vezzani, Diego F. Eiras, Cristina Wisnivesky*. Dirofilariasis in Argentina: Historical review and first report of *Dirofilaria immitis* in a natural mosquito population. Original Research Article. *Veterinary Parasitology*. – Volume 136. – Issues 3–4. – 31 March 2006. – P. 259–273.

2. *Shuqing Zuo, Qiumin Zhao, Xiaofang Guo et al.* Detection of Quang Binh virus from mosquitoes in China. Original Research Article. *Virus Research*. – Volume 180. – 13 February 2014. – P. 31–38.

3. *Maria C. Tranchida, Sebastián A. Pelizza, Maria V. Micieli, Arnaldo Maciá*. Consequences of the introduction of the planarian *Girardia anceps* (Tricladida: Dugesiidae) in artificial containers with larvae of the mosquitoes *Aedes aegypti* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) from Argentina. Original Research Article. *Biological Control*. – Volume 71. – April 2014. – P. 49–55.

4. *Путелина Л.А.* К изучению фауны комаров (Diptera, Culicidae) бассейна реки Яны // Вредные насекомые и гельминты Якутии. – Якутск, 1971. – С. 67–72.

5. *Саввинов И.А.* Рекомендации по защите лошадей от кровососущих двукрылых насекомых. – Якутск, 1976. – 16 с.

6. *Кухарчук Л.П.* Кровососущие комары (Diptera, Culicidae) Сибири. – Новосибирск: Наука, 1980. – 232 с.

7. *Потапова Н.К.* Кровососущие комары (Diptera, Culicidae) среднетаёжной подзоны Якутии: Автореф. дис. ... к.б.н. – Новосибирск, 1992. – 24 с.

8. *Решетников А.Д.* Гастерофилезы лошадей и гнус в условиях Республики Саха (Якутия) (фауна, экология, фенология, регуляция численности и меры борьбы): Автореф. дис. ... д.вет.н. – М., 2000. – 34 с.

9. Решетников А.Д., Прокопьев З.С., Барашкова А.И., Семенова К.Е. Сезонный ход численности компонентов гнуса Северо-Восточной Якутии и их фенологическая сигнализация // Наука и образование. – 2009. – № 2. – С. 100–103.

10. Решетников А.Д., Прокопьев З.С., Барашкова А.И., Семенова К.Е. К суточной активности компонентов гнуса Северо-Восточной Якутии // Известия Самарского НЦ РАН. – Самара, 2009. – Т. 11, № 1. – С. 147–149.

11. Барашкова А.И. Сезонность лёта кровососущих комаров (Diptera, Culicidae) центральной зоны Якутии // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. – СПб., 2010. – № 3. – С. 14–15.

12. Барашкова А.И., Решетников А.Д. Экология кровососущих комаров (Diptera, Culicidae) цен-

тральной таёжной зоны Якутии // Известия Самарского НЦ РАН. – Самара, 2012. – Т. 14, № 5. – С. 143–144.

13. Николаева Н.В., Ольшванг В.Н. Простейший биоценометр для учета водных животных в мелких водоемах // Экология. – 1978. – №5. – С. 93–95.

14. Детинова Т.С., Расницын С.П., Маркович Н.Я. и др. Унификация методов учета численности кровососущих двукрылых насекомых // Мед. паразитол. и паразитарные болезни. – 1978. – Т. XLVII, вып. 5. – С. 84–92.

15. Павлова Р.П., Хлызова Т.А., Ржаников С.Н. Сезонная динамика численности кровососущих комаров в южной тайге Тюменской области // Труды Всерос. науч.-исслед. ин-та вет. энтомологии и арахнологии. – Тюмень, 2004. – Т. 46. – С. 72–84.

Поступила в редакцию 27.01.2015

УДК 502:597(571.56)

Современное состояние рыбной части сообщества в водоемах Якутии

М.М. Тяптиргянов

Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

Представлены результаты многолетних исследований биологических характеристик рыб из водоемов Якутии. Большие изменения в общей экологической ситуации в регионе и особенно возрастающее влияние антропогенного фактора вызвали необходимость новой оценки состояния рыбного населения в современных условиях, выявление основных тенденций в составе рыбного населения с выходом на экологическое прогнозирование. На основе проведенных исследований выявлен ряд закономерностей в изменениях популяций рыб, обитающих на северной границе распространения, в условиях загрязнения водоемов тяжелыми металлами от предприятий горнодобывающей промышленности. Рост численности многих видов промысловых рыб в водоемах Якутии резко снижается из-за антропогенного пресса и прежде всего за счет несанкционированных сбросов промышленных вод, их многочисленных отвалов и стоков, сельскохозяйственных отходов, строительных и бытовых стоков в речные и озерные системы. Необходимо создать экономическую предпосылку для развития рыбной отрасли республики, а это возможно через проведение рыбоводных мероприятий в озерах республики.

Ключевые слова: арктический омуль, сиг-пыжьян, муксун, чир, пелядь, сибирская ряпушка, тугун, обыкновенный валец, нельма, пелагические формы, нерест.

The article reports the results of the long-term studies of fish biological characteristics of Yakutia water basin. Considerable changes in the general environmental situation of the region and especially the increasing influence of the so-called human factor required a new assessment of the fish fauna state under current conditions, identifying the main trends in the composition of the fish fauna and further ecological forecasting. On the basis of the conducted studies a number of regularities in changes in fish fauna of the northern border of its distribution under the conditions of water pollution by heavy metals from the mining industry are identified. The growth of many industrialized fish species in the water basin of Yakutia is sharply reduced because of the anthropogenic pressure and first of all because of unauthorized discharges of industrial waste waters, their long-term dumps and sewages, utilities, agricultural wastes, construction and domestic wastes in river and lake systems. It is necessary to create economic preconditions for development of the fishing industry of the republic by realization of fish-breeding measures in the lakes of the republic.

ТЯПТИРГЯНОВ Матвей Матвеевич – к.б.н., доцент, matyap@mail.ru.

9. Решетников А.Д., Прокопьев З.С., Барашкова А.И., Семенова К.Е. Сезонный ход численности компонентов гнуса Северо-Восточной Якутии и их фенологическая сигнализация // Наука и образование. – 2009. – № 2. – С. 100–103.

10. Решетников А.Д., Прокопьев З.С., Барашкова А.И., Семенова К.Е. К суточной активности компонентов гнуса Северо-Восточной Якутии // Известия Самарского НЦ РАН. – Самара, 2009. – Т. 11, № 1. – С. 147–149.

11. Барашкова А.И. Сезонность лёта кровососущих комаров (Diptera, Culicidae) центральной зоны Якутии // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. – СПб., 2010. – № 3. – С. 14–15.

12. Барашкова А.И., Решетников А.Д. Экология кровососущих комаров (Diptera, Culicidae) цен-

тральной таёжной зоны Якутии // Известия Самарского НЦ РАН. – Самара, 2012. – Т. 14, № 5. – С. 143–144.

13. Николаева Н.В., Ольшванг В.Н. Простейший биоценометр для учета водных животных в мелких водоемах // Экология. – 1978. – №5. – С. 93–95.

14. Детинова Т.С., Расницын С.П., Маркович Н.Я. и др. Унификация методов учета численности кровососущих двукрылых насекомых // Мед. паразитол. и паразитарные болезни. – 1978. – Т. XLVII, вып. 5. – С. 84–92.

15. Павлова Р.П., Хлызова Т.А., Ржаников С.Н. Сезонная динамика численности кровососущих комаров в южной тайге Тюменской области // Труды Всерос. науч.-исслед. ин-та вет. энтомологии и арахнологии. – Тюмень, 2004. – Т. 46. – С. 72–84.

Поступила в редакцию 27.01.2015

УДК 502:597(571.56)

Современное состояние рыбной части сообщества в водоемах Якутии

М.М. Тяптиргянов

Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск

Представлены результаты многолетних исследований биологических характеристик рыб из водоемов Якутии. Большие изменения в общей экологической ситуации в регионе и особенно возрастающее влияние антропогенного фактора вызвали необходимость новой оценки состояния рыбного населения в современных условиях, выявление основных тенденций в составе рыбного населения с выходом на экологическое прогнозирование. На основе проведенных исследований выявлен ряд закономерностей в изменениях популяций рыб, обитающих на северной границе распространения, в условиях загрязнения водоемов тяжелыми металлами от предприятий горнодобывающей промышленности. Рост численности многих видов промысловых рыб в водоемах Якутии резко снижается из-за антропогенного пресса и прежде всего за счет несанкционированных сбросов промышленных вод, их многочисленных отвалов и стоков, сельскохозяйственных отходов, строительных и бытовых стоков в речные и озерные системы. Необходимо создать экономическую предпосылку для развития рыбной отрасли республики, а это возможно через проведение рыбоводных мероприятий в озерах республики.

Ключевые слова: арктический омуль, сиг-пыжьян, муксун, чир, пелядь, сибирская ряпушка, тугун, обыкновенный валец, нельма, пелагические формы, нерест.

The article reports the results of the long-term studies of fish biological characteristics of Yakutia water basin. Considerable changes in the general environmental situation of the region and especially the increasing influence of the so-called human factor required a new assessment of the fish fauna state under current conditions, identifying the main trends in the composition of the fish fauna and further ecological forecasting. On the basis of the conducted studies a number of regularities in changes in fish fauna of the northern border of its distribution under the conditions of water pollution by heavy metals from the mining industry are identified. The growth of many industrialized fish species in the water basin of Yakutia is sharply reduced because of the anthropogenic pressure and first of all because of unauthorized discharges of industrial waste waters, their long-term dumps and sewages, utilities, agricultural wastes, construction and domestic wastes in river and lake systems. It is necessary to create economic preconditions for development of the fishing industry of the republic by realization of fish-breeding measures in the lakes of the republic.

ТЯПТИРГЯНОВ Матвей Матвеевич – к.б.н., доцент, matyap@mail.ru.

Key words: Yakutia, Arctic cisco, whitefish, muksun, round-nosed whitefish, peled, Siberian cisco, tugun, round fish, nelma, pelagic forms, spawning.

В настоящее время усиленное развитие энергетики, нефтегазовой и горноперерабатывающей промышленности, рост численности населения, а также сельскохозяйственных угодий привели к общему увеличению количества загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду. Со стоками промышленных предприятий в озера и реки попадают сульфаты, фосфаты, тяжелые металлы, алюминий, флото-реагенты и целый ряд других веществ, оказывающих негативное влияние на водные экосистемы [1–7]. Большая скорость сукцессионных процессов пресноводных экосистем Якутии, а также их влияние негативно отразилось на отдельных структурных показателях популяций. В результате этих изменений сократилось число возрастных групп, уменьшилась продолжительность жизни особей, в уловах стали преобладать рыбы младших возрастных групп, снизилась мощность нерестовых стад, отмечается раннее половое созревание и растянутый период наступления половой зрелости [8–10].

Впервые антропогенное воздействие было выявлено исследователями в результате экспедиционных работ на Кольском полуострове, что дало начало дальнейшим исследованиям в этом направлении других техногенно-трансформированных водных экосистем страны. При этом приоритетными загрязнителями по токсичности и количественным показателям для водоемов являются тяжелые металлы и окислы серы, которые могут переноситься вместе с воздушными массами на большие расстояния [11–12].

В работе были использованы материалы по общепринятым в ихтиологии методикам [13–16].

Актуальность разработки методов экологического прогнозирования резко возрастает в связи с усиливающимся влиянием на северные экосистемы хозяйственной деятельности человека.

Арктический или ледовитоморский омуль. В пределах Палеарктики ареал омуля простирается от Мезенского залива до Чаунской губы.

В дельтовой и обширной приморской зонах, которые омуль и другие виды используют в качестве нагульных угодий, формируются и нерестовые стада производителей омуля. Половой зрелости достигает на седьмом году жизни, размножается неежегодно и за свою жизнь самка омуля мечет икру всего 2–3 раза. Абсолютная плодовитость от 16 до 67 тыс. икринок. Начало нереста происходит во второй половине сентября, при понижении температуры воды до 1,5–3,0 °С, на участках реки с песчано-галечными песчаными грунтами. Основу уловов составля-

ют особи длиной (ас) 370–600 мм, массой 700–2100 г.

Основное количество производителей приходится на рыб в возрасте 7+ – 10+ лет, составляющих в нерестовом стаде более 80 %. По характеру питания омуль является типичным эврифагом. Пищей ему служат зообентос, зоопланктон и молодь рыб. Вылов омуля в водоемах Якутии колеблется от 0,6 до 1,3 тыс. т, в среднем за десять последних лет 880 т при ежегодной квоте около 1100 т. В последнее время из-за антропогенного пресса промысловые запасы арктического омуля падают. Увеличение вылова рыбы возможно развитием товарного рыболовства и контролем за соблюдением Правил рыболовства.

Сиг-пыжьян. В Сибири встречается в реках, впадающих в моря Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское.

В уловах сиг представлен десятью возрастными группами от 5+ до 14+ лет. Основу улова составляют рыбы в возрасте от 7+ до 10+ лет, длиной тела от 300 до 410 мм и массой от 300 до 1000 г. Достигнув половой зрелости на седьмом, в массе – на восьмом–девятом году жизни, сизи начинают в начале осени перемещаться к основным местам размножения. Абсолютная плодовитость сига-пыжьяна подвержена значительным колебаниям от 2,5 до 140,0 тыс. икринок. Нерест сига во всех реках Якутии происходит в конце сентября – начале октября. Места нагула расположены в прибрежной зоне с достаточной глубиной и подверженной слабому прогреванию. Пищевой спектр более разнообразен и включает (частота встречаемости): личинки хирономид – 54 %, остатки высшей растительности – 36 %, моллюски – 20 %, икра ряпушки – 18 % и веслоногие рачки – 9 %. Важная промысловая рыба, но запасы ее под действием антропогенного фактора за последние годы заметно сократились. Одним из путей доведения до санитарной нормы потребления рыбной продукции для жителей Крайнего Севера является выращивание товарной рыбы как на естественных, так и на искусственных кормах жизнестойких посадочных материалов в специализированных рыбопитомниках.

Муксун. По образу жизни относится к типично солоновато-водным полупроходным рыбам. В зимнее время муксун всех возрастных групп обитает в дельте и авандельте основных рек Якутии. Половая зрелость муксуна во всех водоемах Якутии наступает примерно в одном возрасте, на девятом–десятом году жизни, при

длине тела (ас) 47–55 см. Нерест муксуна начинается в период образования льда и заканчивается в конце ноября. Чаще всего нерестовые участки расположены на перекатах с крупно-песчаным и галечным дном. Абсолютная плодовитость муксуна равна 13,7–161,5 тыс. икринок. Позднее половое созревание и периодичность полового цикла нескольких лет у самок определяют большую уязвимость этого вида от промысла. Необходимы охраняемые мероприятия на местах нагула и формирования нерестовых скоплений. Состав пищи разнообразен, наряду с рачковым кормом муксун широко использует бентосные организмы, особенно личинки и куколки хирономид, а также икру сибирской ряпушки и других рыб. В настоящее время в реках Якутии хозяйственное значение муксуна весьма ограничено и запасы его претерпевают большое антропогенное возмущение. Вылов муксуна можно увеличить только путем искусственного воспроизводства.

Чир. На территории Якутии чир населяет все реки, впадающие в море Лаптевых и Восточно-Сибирское, преимущественно в нижнем и среднем течениях. Особенно многочислен он в тундровых озерах и реках Колымо-Индибирской и Яно-Индибирской низменностей.

В промысловых уловах чир встречается длиной (ас) от 24 до 56 см. Средние размеры чира бассейна Колымы составили 38,9; 40,5 и 36,3 см по наблюдениям 1970 г. (n=413), 1971 г. (n=712) и 2013 г. (n=217), что указывает на измельчение его промысловых уловов. Изменились также и весовые показатели. Так, если чир в возрасте 7+ лет в 1971 г. имел массу 768 г, а в показателях 2013 г. – 720 г, то в возрасте 10+ лет – соответственно 1395 г в 1971 г. и 1183 г в 2013 г. Произошло и снижение встречаемости чира. Если в 1971 г. встречались чирьи в возрасте 8+ лет – 32 %, в 1986 г. – 29 %, то теперь – 27 %. Все это указывает на неблагоприятное состояние экосистемы р. Колымы в результате деятельности антропогенного фактора.

Поскольку чир в низовьях р. Колымы созревает на 6–7-м году жизни, то на долю половозрелых рыб в уловах приходится 96 %.

По характеру размножения чир в течение жизни нерестует 2–3 раза за жизненный цикл. Абсолютная индивидуальная плодовитость чира колеблется от 17,6 до 72,6 тыс. икринок.

Питается чир преимущественно моллюсками и личинками хирономид. Личинки поденок, веснянок и других насекомых в питании существенной роли не играют.

Обладая высокими пищевыми качествами, чир пользуется большим спросом у населения и имеет большую хозяйственную ценность.

Незначительное количество половозрелых рыб в промышленных уловах и сильное омоложение популяции чира свидетельствуют о том, что запасы чира во многих водоемах Якутии находятся в чрезвычайно напряженном состоянии.

Пелядь. В уловах отмечены представители девяти возрастных групп от 4+ до 12+ лет. Наиболее меньшей в размерной группе была особь длиной (ас) 23 см, а наибольшей – 47 см, массой тела от 170 г до 1360 г.

Половозрелость пелядь достигает в возрасте 3+ – 4+, в массе – 5+ лет.

Абсолютная плодовитость составляет при колебании 26,1–88,4 тыс. икринок.

Анализом содержимого пищеварительных трактов установлено, что в питании пеляди встречаются 10 групп компонентов. Из них важнейшее значение имеют листоногие рачки *Lynceus brachiurus* (частота встречаемости 50 %) и моллюски (18 %). Обращает на себя внимание большое количество остатков водной растительности (28 %) и воздушных насекомых (15 %). Кроме того, встречены *Cladocera* (8 %), *Hydracarina* (4 %), личинки хирономид (6 %), ручейники имаго (6 %), диатомные, синие и синезеленые водоросли (9 %) и девятиглая колюшка (2 %). Отмечаемое за последнее десятилетие резкое снижение уловов пеляди вызвано сокращением ее численности.

Сибирская ряпушка. Имеет широкое расселение – от бассейна рек Белого моря на западе до Берингово море на востоке. Обитает во всех реках Якутии. Осенний ход ряпушки в низовьях р. Яны начинается в первой декаднейке сентября при температуре воды 11,1°C, массовый – во второй при 6,7°C. Индивидуальная абсолютная плодовитость ряпушки колебалась от 6,0 до 72,7 икринок.

Промыслом охватываются особи, имеющие длину тела (ad) 20–34 см.

Более половины улова (63 %) представлено рыбами длиной 24–33 см.

Средняя масса 212 г при длине тела 30 см. В уловах преобладали ряпушки двух возрастов – 5+ и 6+ лет, которые составляли 69 % от всего вылова.

Самцы ряпушки заметно уступают в росте самкам. Если шестилетние самки имели среднюю длину тела (ас) 29 см, самцы – 28 см, то семилетние – соответственно 35 см и 29 см.

Хозяйственное значение ряпушки в экономике Якутии велико. В то же время в результате усиленного промысла и отрицательного влияния сброса промышленных и бытовых стоков запасы сибирской ряпушки оказались подорванными. Этот важный объект любительского и

промышленного вылова рыбы сейчас рассматривается как один из перспективных видов товарного рыболовства.

Заключение

Рост численности многих видов промысловых рыб в водоемах Якутии резко снижается из-за антропогенного пресса и прежде всего за счет несанкционированных сбросов промышленных вод, их многочисленных отвалов и стоков, сельскохозяйственных отходов в речные и озерные системы. Необходимо создать экономическую предпосылку для развития рыбной отрасли республики, а это возможно через проведение товарного рыболовства в специализированных рыбопитомниках. Для увеличения численности многих рыб рекомендовано их вылов вести с некоторым ограничением, а именно сокращением лимита вылова на сибирского осетра, обыкновенного тайменя, гольца Черского, чира, сига-пыжьяна, муксуна и нельму. Увеличить при этом вылов таких рыб, как щуки, серебряного и обыкновенного карасей, ельца, плотвы, озерного и обыкновенного голянов, налима и речного окуня.

Первоочередная задача – государственная поддержка нового направления рыбного хозяйства – товарного рыболовства, ориентированного на выпуск молоди ценных рыб для нагула в естественные водоемы или специализированные рыбопитомники с целью ее выращивания до товарных размеров. Прежде всего, это сибирский осетр, голец Черского, нельма, чир, сиг-пыжьян, муксун, пелядь, тугун и др., тем более, что их разведение принесет еще больший успех в практику рыболовства и создаст высокий имидж республике.

Решить эти задачи возможно, только увеличив набор студентов по специализации и созданию высокооплачиваемых новых рабочих мест для нужд Якутии, как ихтиолог, рыбовод, гидробиолог, гидрохимик, маркетер, технолог по рыбной промышленности, по специальностям высшего и среднего звена, подготовкой которых занимаются в Институте естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, Якутской сельскохозяйственной академии и Якутском сельскохозяйственном техникуме.

Литература

1. *Моисеенко Т.И.* Ихтиофауна озера Имандра // Экосистемы озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. – Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1980. – С. 48–58.
2. *Моисеенко Т.И.* Изменение некоторых биологических показателей рыб как экологический мониторинг // Состояние природной среды и прогноз ее применения. – Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1982. – С. 48–58.
3. *Решетников Ю.С., Попова О.А., Стерлигова О.П. и др.* Изменение структуры рыбного населения эвтрофируемого водоема. – М.: Наука, 1982. – 248 с.
4. *Моисеенко Т.И.* Влияние на рыб загрязнения субарктического водоема (на примере озера Имандра): Автореф. дис. ... к.б.н. – Л.: ГосНИОРХ, 1983. – 28 с.
5. *Решетников Ю.С., Акимова Н.В., Попова О.А.* Аномалии в системе воспроизводства рыб при антропогенном воздействии // Изв. Самарского НЦ РАН. – 2000. – Т. 2, № 2. – С. 274–282.
6. *Моисеенко Т.И., Дауэвальтер В.А., Кудрявцева Л.П. и др.* Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Под ред. Т.И. Моисеенко. – М.: Наука, 2002. – 487 с.
7. *Решетников Ю.С., Попова О.А.* Оценка состояния пресноводных экосистем по состоянию рыбной части сообществ // Проблемы экологии и рационального природопользования Северо-Запада России и Псковской области. – Псков: ПГПИ, 1995. – С. 41–52.
8. *Решетников Ю.С., Попова О.А.* Новая экологическая ситуация в водоемах Европейского Севера России // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Сб. матер. IV (XXVII) Межд. конф. – Вологда: ВГПУ, 2005. – Ч. 2. – С. 88–90.
9. *Решетников Ю.С., Терещенко В.Г., Лукин А.А.* Динамика рыбной части сообщества в изменяющихся условиях обитания (на примере оз. Имандра) // Рыбное хоз-во. – 2011. – № 6. – С. 48–51.
10. *Решетников Ю.С.* Экология и систематика сиговых рыб. – М.: Наука, 1980. – 300 с.
11. *Крючков В.В., Макарова Т.Д.* Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. – Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1989. – 96 с.
12. *Раткин Н.Е.* Закономерности и уровни аэротехногенного загрязнения ландшафтов в Мурманской области и Севера Скандинавии: Автореф. дис. ... д.г.н. – М., 2006. – 52 с.
13. *Чугунова Н.И.* Руководство по изучению возраста и роста рыб. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 162 с.
14. *Правдин И.Ф.* Руководство по изучению рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 376 с.
15. *Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях.* – М.: Наука, 1974. – 254 с.
16. *Мина М.В.* Рост рыб (методы исследования в природных популяциях) // Рост животных. Зоология позвоночных. – М.: ВИНТИ, 1973. – Т. 4. – С. 68–115.

Поступила в редакцию 26.06.2015

Коммунальное загрязнение р. Лена в окрестностях г. Якутска и его роль в распространении дифиллоботриоза

Т.А. Платонов*, Н.В. Кузьмина**, И.И. Бочкарев**, А.Н. Нюкканов**

* Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, г. Якутск

** Якутская государственная сельскохозяйственная академия, г. Якутск

Основным источником загрязнения р. Лена является сброс неочищенных сточных вод г. Якутска. В настоящее время в городе функционируют канализационные очистные сооружения (КОС) механической очистки производительностью 35 тыс. м³/сут. Обеззараживание производится жидким хлором. Сброс сточных вод осуществляется по двум трубопроводам в р. Лена в 1,5 км ниже основного водосбора. На КОС поступает 50–55 тыс. м³ сточных вод в сутки. Одна третья часть хозяйственно-бытовых сточных вод г. Якутска через сливную станцию поступает в основной коллектор и без очистки сбрасывается в р. Лена. Водный фактор оказывает существенное влияние на уровень заболеваемости населения инфекционными и инвазионными заболеваниями, передающимися фекально-оральным путем. Заболеваемость населения г. Якутска острыми кишечными инфекциями ежегодно составляет в среднем 1000 случаев на 100 000 чел., дифиллоботриозом – 900 случаев на 100 000 чел., что указывает на высокую степень загрязнения реки коммунальными отходами. Для выявления экологической обусловленности распространения инфекционных и инвазионных болезней среди населения г. Якутска нами проведены исследования проб воды на наличие санитарно-показательных микроорганизмов. Исследования показали широкую циркуляцию и высокий уровень содержания санитарно-показательных микроорганизмов. Колиформные бактерии за 2005–2010 гг. составили 7839,9 КОЕ в 1 л. Наибольшая степень загрязнения наблюдается весной в период паводка 240 КОЕ в 100 мл. Содержание термотолерантных колиформных бактерий во всех пробах не соответствует гигиеническим нормативам (СанПиН 2.1.5.980-00) и доходит до 24000 КОЕ в 100 мл. Общее микробное число в период наблюдения варьировало от 4 до 105 КОЕ в 1 мл. Сульфитредуцирующие клостридии и цисты лямблий (*Gardia lamblia* cyst) в среднем за 5 лет составили 1,93 КОЕ в 20 мл и 3,2 цист в 25 л, соответственно. Наличие санитарно-показательных микроорганизмов в среднем течении р. Лена указывает на существенное загрязнение акватории коммунальными отходами г. Якутска, что ведет к распространению заболеваемости населения острыми кишечными инфекциями и дифиллоботриозом.

Ключевые слова: коммунальное загрязнение реки, санитарно-показательные микроорганизмы.

The main source of pollution of the Lena river is the discharge of unpurified sewage water in Yakutsk city. Currently there are sewage mechanical purification works with the capacity of 35 thousand m³/day in the city. They apply liquid chlorine disinfection. Wastewater is discharged through two pipelines into the Lena river 1,5 km lower than the main water production area. 50–55 thousand m³/day of wastewater come to sewage mechanical purification works. One third of household waste water through the drain station enters the main collector and without treatment is discharged into the Lena river. The water factor has a significant impact on the level of cases infected by infectious and parasitic diseases transmitted by fecal-oral route. In Yakutsk those infected by intestinal infections annually amount to 1,000 cases on average per 100,000 people, by diphyllobothriasis – 900 cases per 100,000 people, which indicates a high degree of pollution of the river by municipal wastes. To identify environmental conditionality of spread of infectious and parasitic diseases among the population of Yakutsk we have studied water samples for sanitary microorganisms. The studies have shown a wide circulation and high levels of sanitary microorganisms. For 2005-2010 Coliform bacteria amounted to 7839.9 CFU per liter. The greatest degree of contamination is observed during the spring flood – 240 CFU per 100 ml. The content of thermotolerant Coliform bacterias in all samples does not meet the hygienic standards (SanPiN 2.1.5.980-00) and goes up to 24,000 CFU per 100 ml. The total bacterial number during observation varied from 4 to 105 CFU per 1 ml. Sulfite-reducing clostridia (SRC) and

* ПЛАТОНОВ Терентий Афанасьевич – к.б.н., н.с., platonov74@mail.ru; ** КУЗЬМИНА Наталья Васильевна – соискатель, Lucinanatalia58@gmail.com; ** БОЧКАРЕВ Иннокентий Ильич – д.б.н., проф.; ** НЮККАНОВ Аян Николаевич – д.б.н., доцент, ayan1967@mail.ru.

Giardia cysts (Gardia lamblia cyst) on average over 5 years amounted to 1,93 CFU per 20 ml. and 3,2 cysts per 25 l correspondingly. The presence of sanitary microorganisms in the middle of the Lena river indicates significant water pollution by municipal wastes in Yakutsk, which leads to the spread of cases infected by intestinal infections and diphyllbothriasis.

Key words: municipal pollution of the river, sanitary and indicative microorganisms.

В связи с усилением влияния хозяйственной деятельности человека на наземные и пресноводные экосистемы насущными проблемами во всем мире стало загрязнение больших территорий промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми стоками. Во многих пресноводных экосистемах наблюдаются сукцессионные изменения.

Река Лена – главная водная артерия, по своей длине и площади бассейна она занимает первое место в республике. Входит в десятку крупнейших рек мира. Очень малые водотоки (длиной до 10 км) составляют свыше 94 % от общего числа рек республики. Густота речной сети относительно большая – в среднем около 0,5 км/км². В горных районах она достигает 1,0–1,2 км/км², а на Центральноякутской равнине уменьшается до 0,1 км/км².

Основным источником загрязнения р. Лена является сброс неочищенных сточных вод г. Якутска. В настоящее время в городе функционируют канализационные очистные сооружения (КОС) механической очистки производительностью 35 тыс. м³/сут. Обеззараживание производится жидким хлором. Сброс сточных вод осуществляется по двум трубопроводам в р. Лена в 1,5 км ниже основного водозабора. На КОС поступает 50–55 тыс. м³ сточных вод в сутки. Одна третья часть хозяйственно-бытовых сточных вод г. Якутска через сливную станцию поступает в основной коллектор и без очистки сбрасывается в р. Лена [1]. Город Якутск имеет крупнейший речной порт в республике, который является еще одним мощным источником антропогенного воздействия (физического, химического и биологического) на водную среду и ее обитателей [2]. Эксплуатация судов ведет к загрязнению водоемов нефтепродуктами. Сброс в воду с судов фекальных масс ведет к биологическому загрязнению водоемов. С фекальными массами в водоемы попадают яйца лентеца широкого (*Diphyllbothrium latum*), заражение которым происходит при употреблении в пищу полусырой рыбы [3]. Фекальное загрязнение имеет большое эпизоотическое значение в распространении дифиллоботриозной инвазии среди пресноводных рыб р. Лена.

В этой статье мы попытались обобщить и систематизировать информацию последних пяти лет о загрязнении фекальными массами воды

среднего течения р. Лена на основании содержания бактерий группы кишечной палочки. К бактериям группы кишечной палочки относят различных представителей семейства Enterobacteriaceae, родов *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* и др. Это грамотрицательные (Гр(-)), не образующие спор палочки, сбраживающие лактозу с образованием кислоты и газа при 37±0,5 °С в течение 24–48 ч или сбраживающие глюкозу с образованием кислоты и газа при 37±0,5 °С в течение 24 ч и не обладающие оксидазной активностью. По международной классификации такие микроорганизмы относятся к общим колиформным бактериям (ОКБ). Они попадают в воду с испражнениями человека и животных, поэтому обнаружение их свидетельствует о фекальном загрязнении окружающей среды.

Материал и методы исследования. Исследования на наличие санитарно-показательных микроорганизмов проводили с использованием МУК 4.2.1884-04 [4]. Материалом данной работы послужили фондовые материалы ГУП «Водоканал» за 2005–2010 гг., пробы, набранные в районе Даркылахского водозабора.

Результаты исследования и их обсуждение. Как видно из таблицы, в результате пятилетнего цикла исследований (2005–2010 гг.) качества воды среднего течения р. Лена установлены высокий уровень содержания изучаемых микроорганизмов, широкое распространение их на месте водозабора и сезонные колебания уровня загрязнения с нарастанием показателей от периода весеннего паводка к осени.

Колиформные организмы (общие колиформы) Колиформные организмы являются удобными микробными индикаторами качества питьевой воды. Согласно рекомендациям СанПиН, колиформные бактерии не должны обнаруживаться в системах водоснабжения с подготовленной водой. Присутствие же колиформных организмов в воде свидетельствует о ее недостаточной очистке, вторичном загрязнении или о наличии в воде избыточного количества питательных веществ (таблица). Общие колиформные бактерии в среднем за 2005–2010 г. составили 7839,9 КОЕ в 1 л. Наиболее выраженная степень загрязнения наблюдалась в период паводка весной, доходящая до 240 КОЕ в 100 мл. Следует подчеркнуть, что независимо от степени загрязнения изучаемого участка наибольший

КОММУНАЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ Р. ЛЕНА В ОКРЕСТНОСТЯХ Г. ЯКУТСКА

Результаты санитарно-бактериологического анализа воды за 2005–2010 гг.
(место отбора р. Лена в окрестностях г. Якутска)

Показатели	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	Среднее значение за 2005-2010 гг.	Среднее квадратичное отклонение за 2005-2010 гг.
Общие колиформные бактерии (ОКБ), КОЕ в 1 л	264,17	40215,0	541,2	152,18	2213,83	3653,29	7839,9	19930,5
Термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ), КОЕ в 1 л	206,67	40215,0	321,6	152,18	2213,83	3653,29	7793,8	19934,7
Общее микробное число, КОЕ в 1 мл	18,67	21,33	19,8	21,27	29,83	29,14	23,3	18,0
Колифаги, БОЕ в 100 мл	3,20	6,32	4,3	4,78	6,67	7,23	5,4	5,1
Споры сульфитредуцирующих клостридий, КОЕ в 20 мл	2,92	3,33	2,4	1,55	1,25	0,14	1,93	1,96
Цисты лямбий, число цист в 25 л	0,17	0,30	3,5	4,09	4,75	6,61	3,2	2,5

уровень содержания отмечается именно в колиформных организмах. Исследования выявили высокую степень загрязнения воды колиформными микроорганизмами в среднем $7839,9 \pm 19930,5$.

Такое высокое бактериальное загрязнение может оказывать влияние и на качество воды биотопов, расположенных выше по течению реки вследствие сгонно-нагонных явлений, способствующих распространению загрязнений вверх по реке (нагонные) и ухудшающих процессы бактериального самоочищения реки за счет сгонных ситуаций, а также повышающих вероятность распространения инвазий рыб, передаваемых из-за коммунального загрязнения.

Термотолерантные колиформные бактерии обладают всеми признаками бактерий семейства Enterobacteriaceae, и, кроме того, ферментируют лактозу с образованием альдегида, кислоты и газа при температуре 44 °С в течение 24 ч. Термотолерантность быстро утрачивается, поэтому обнаружение бактерий с таким свойством свидетельствует о недавнем попадании в воду кишечных бактерий (свежее фекальное загрязнение). Качество речной воды характеризуется низким санитарно-бактериологическим показателем по отношению термотолерантных колиформных бактерий и отражает постоянное поступление в реку значительных биологических загрязнений.

В среднем за изучаемый период содержание выделения термотолерантных колиформных бактерий составило 100%. Средний уровень содержания данных индикаторных микроорганизмов во всех пробах реки не соответствовал гигиеническим нормативам (СанПиН 2.1.5.980-00), причем обращает на себя внимание, что содержание термотолерантных колиформных бактерий в зимний период, в период ледостава, порой значительно выше летнего периода и доходит до 24000 КОЕ в 100 мл в январе 2010 г. Вышеизложенное свидетельствует о том, что в изученном месте наблюдается свежее фекальное загрязнение воды.

Сульфитредуцирующие клостридии (СРК) – это крупные грамположительные спорообразующие палочки, у которых диаметр спор превышает диаметр вегетативной клетки, облигатные анаэробы. Данная группа клостридий обладает свойством восстанавливать сульфиты до сульфидов, что используется при их идентификации. Поскольку способностью редуцировать сульфиты обладают только споровые анаэробы кишечного происхождения, это позволило выделить данную группу микроорганизмов как санитарно-показательную. Доминирующей представитель СРК – Clostridium perfringens. Эта бактерия является постоянным консорбиентом кишечного тракта, хотя ее численность значительно ниже, чем E. coli. Споры СРК имеют

высокую устойчивость в окружающей среде, поэтому их обнаружение в воде может свидетельствовать о давнем фекальном загрязнении. Однако, учитывая, что они способны при благоприятных условиях размножаться в окружающей среде (особенно в почве), ценность спор СРК как показателя фекального загрязнения не высока. В то же время СРК относятся к индикаторам биологического загрязнения воды: наличие их спор будет указывать на возможное присутствие сходных по устойчивости цист и ооцист простейших и жизнеспособных яиц гельминтов, что чрезвычайно важно для мониторинга дифиллоботриозной инвазии среди рыб.

Споры клостридий способны существовать в воде значительно дольше, чем колиформные организмы, и они более устойчивы к обеззараживанию. Их присутствие в прошедшей дезинфекции воде может указывать на ее недостаточную очистку и, следовательно, на то, что устойчивые к обеззараживанию патогенные микроорганизмы могли не погибнуть.

Из-за своей способности к длительному присутствию в воде сульфитредуцирующие клостридии лучше всего подходят для обнаружения периодического или давнего загрязнения.

С другой стороны, именно в силу того, что клостридии имеют тенденцию к выживанию и накапливанию в воде, они могут обнаруживаться намного позднее и дальше от места загрязнения, что может усложнить интерпретацию результатов биологического исследования качества воды.

Именно поэтому, несмотря на свое особое значение, тест на сульфитредуцирующие клостридии не включен ВОЗ в обязательный перечень для рутинного контроля распределительных систем. Тем не менее, этот параметр контролируется российскими санитарными нормами.

Общее микробное число – это количественный показатель, отражающий общее содержание мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в 1 мл исследуемой воды. Данный тест имеет невысокую ценность как индикатор присутствия патогенных микроорганизмов, тем не менее, ОМЧ при 37 °С является важным интегральным санитарным показателем, который позволяет оценить общую микробную обсемененность водного объекта. В период наблюдения этот показатель варьировал в интервале от 4 до 105 КОЕ в 1 мл.

Цисты лямблий (*Gardia Lamblia Cyst*) овальной формы, размером 8–14 мкм в длину и 7–10 мкм в ширину (очистка воды обратным осмосом

дает 100 %-ю гарантию обеззараживания воды – осмос и обратный осмос установки очистки). *Gardia* является одним из самых распространенных паразитов животных, опасных также и для человека.

Нормы СанПиН и USEPA установлены на полное отсутствие данных микроорганизмов в питьевой воде. Отсутствие в воде цист лямблий является важным показателем того, что вода очищена от целого ряда других простейших, таких как покоящиеся стадии (ооцисты) *Cryptosporidium*, амеб, личинки *Diphyllobothrium latum*, а также энтеровирусов. Все перечисленные организмы обладают более высокой устойчивостью к обеззараживанию, чем колиформные и термотолератные колиформные организмы (*E.Coli*), и поэтому отсутствие в воде последних не является гарантией микробиологической безопасности воды. Такую косвенную гарантию и дает отсутствие в воде цист лямблий.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что в изучаемом регионе может иметь место водный путь передачи дифиллоботриозной инвазии среди пресноводных рыб. Тем более, что в пробах в период паводка количество цист лямблий в отдельных пробах достигало 9,3 цист в 25 л.

Заключение

Таким образом, санитарно-бактериологический мониторинг качества воды р. Лена в окрестностях г. Якутска показал широкую циркуляцию и высокий уровень содержания санитарно-показательных микроорганизмов. Мониторинг фекального загрязнения водных объектов позволит повысить надежность санитарно-бактериологического контроля качества воды водных объектов и эпизоотической безопасности воды для пресноводных рыб р. Лена.

Литература

1. *Савилов Е.Д.* Эколого-эпидемическая оценка качества вод реки Лены /Е.Д. Савилов, Ю.А. Долженко, А.П. Протождяконов и др. – Новосибирск: Наука, 2006. – 136 с.
2. *Чистяков Г.Е.* Водные ресурсы рек Якутии. – М.: Наука, 1964.
3. *Зачесов В.П., Филоненко В.Г.* Транспорт Якутии: проблемы материально-технического обеспечения. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2000. – 316 с.
4. *МУК 4.2.1884-04* «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов». – М., 2005.

Поступила в редакцию 16.03.2015