него девона Северо-Востока Евразии на основе цикличности седиментации и этапности развития фауны // Эволюция органического мира и биотические 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.* Коэволюция 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. Kozlowski 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 Siluran 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, многолетнемёрзлые 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 последние 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° до –8,5°С. 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 слабоводоносного 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. м^3 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-

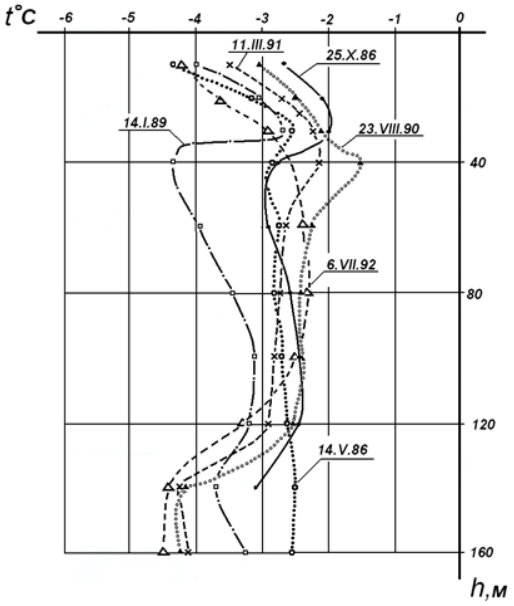


Рис. 2. Характер температурных колебаний в скв. 31, расположенной в центральной части Октябрьского полигона

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 ºС. В последующем это наблюдалось и при эксплуатации Киенгского полигона, где за первые четыре года температура понизилась почти на 3 ºС (рис. 3).

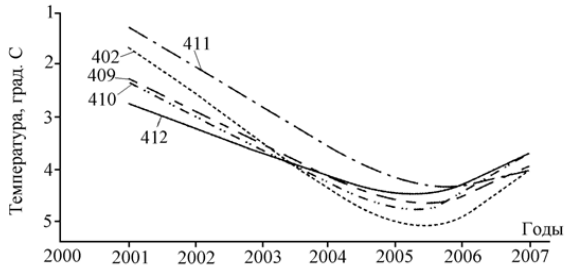


Рис. 3. Динамика температуры горных пород на Киенгском полигоне

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 термокосами 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 меженного 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.

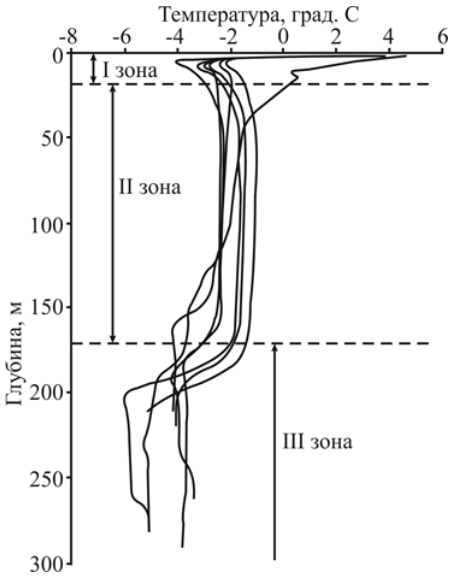


Рис. 4. Расположение гидрогеотермических зон на Киенгском полигоне

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 криопэгов в мерзлую толщу // Материалы Всерос. совещания по подземным водам востока России. – Иркутск, 1994. – С.91.

Поступила в редакцию 21.05.2015