

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.245.1

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-8-41-49

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ

ЖЕЛЕЗНЯК И. И.¹, СТЕТЮХА В. А.²

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16а)

² Забайкальский государственный университет
(Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30)

***Цель работы** – выработка методики и состава работ по проектированию скважин при освоении месторождений полезных ископаемых с учетом воздействия на их конструктивные элементы опасных криогенных процессов в сезонном и оттаивающем слоях дисперсных пород.*

***Актуальность исследований** связана с обеспечением эксплуатационной надежности, эффективности и безопасности работы расположенных в криолитозоне Забайкалья и сопредельных регионов вертикальных геотехнологических, водозаборных и других скважин в рабочем, аварийном или законсервированном состоянии.*

***Методика исследования** предусматривает анализ условий работы рабочей колонны из полимерного материала в скважинах различного назначения с учетом наиболее неблагоприятных климатических и геокриологических факторов, характерных, в частности, для северной части криолитозоны Забайкалья. Оценка влияния этих факторов на колонну из полимерного материала в скважине основывается на использовании законов термодинамики. Учитываются дополнительные нагрузки, создаваемые замерзанием воды в замкнутом заколонном пространстве, сопровождающиеся деформацией колонны при обжатии ее льдом. Оценка устойчивости обсадной трубы на действие касательных сил пучения, сил негативного трения и сейсмического воздействия предусматривает применение положительно зарекомендовавших себя расчетных методов, полученных в результате многолетних натурных и экспериментально-теоретических исследований в Забайкалье.*

***Результаты исследования** представлены в виде рекомендаций, дополняющих состав и содержание работ по проектированию вертикальных геотехнологических, водозаборных и других скважин при освоении месторождений полезных ископаемых в массивах многолетнемерзлых пород.*

***Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; скважина; колонна; обсадная труба; проектирование; прочность; устойчивость.*

Введение. Проблема устойчивости геотехнологических скважин при освоении месторождений полезных ископаемых методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) в условиях криолитозоны связана с перспективой освоения месторождений в урановорудных районах со значительными ресурсами урана и других полезных ископаемых [1, 2], в том числе золота и редких металлов, расположенных в криолитозоне Севера Забайкалья, в частности Чарского (Нечеро-Ничатского) и Сьюльбанского месторождений [3]. Геокриологические условия в подобных регионах [4] требуют решения проблемы распределения нагрузки на конструкции [5, 6]. Специалисты не исключают того, что в пределах юга криолитозоны Восточного Забайкалья, а также в Восточной Монголии и Северном Китае придется столкнуться с проблемой освоения месторождений методом СПВ

в массивах высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП) островного залегания.

В ведомственных нормах технологического проектирования горнодобывающих предприятий методом подземного выщелачивания (*СТО СРО-П 60542948 00033-2015. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий методом подземного выщелачивания*), сформированных на основе накопленного многолетнего опыта в регионах за пределами криолитозоны, не содержится комплекс необходимых для проектирования детальных положений, учитывающих влияние ММП и опасных криогенных процессов на прочность и устойчивость геотехнологических (закачных, откачных, наблюдательных), водозаборных и других скважин в рабочем, аварийном или законсервированном состоянии. Кроме этого, в указанных нормах не содержатся требования экологического характера по учету геокриологических условий района добычи полезного ископаемого методом СПВ, базирующиеся на изучении криогенных процессов, явлений и физико-механических свойств многолетнемерзлых и сезонномерзлых горных пород.

Исследование условий проектирования скважин. В настоящее время единственным в России (и в мире) предприятием, добывающим уран методом скважинного подземного выщелачивания в сложных геокриологических условиях, является, как известно, рудник АО «Хиагда», расположенный в Забайкалье на 390 км северо-восточнее г. Улан-Удэ и на 220 км севернее Читы [7]. Рудник располагается в южном регионе криолитозоны, отличающемся сложными природными и геокриологическими условиями: резко континентальным климатом, отрицательной среднегодовой температурой воздуха, значительными амплитудами суточных и годовых температур, малым количеством летних и зимних атмосферных осадков, незначительной мощностью снежного покрова, широким распространением высокотемпературных (от 0 до $-1,5$ °С) массивов горных пород сплошного и островного залегания сливающегося и несливающегося типа, их глубоким сезонным оттаиванием, а также наличием локальных участков с подземными льдами. Существенное влияние на условия залегания и температурно-влажностный режим ММП оказывают горно-котловинный характер рельефа, ориентация горных хребтов, крутизна и экспозиция склонов, определяющих распределение солнечной радиации и осадков [8].

В связи с этим возникает необходимость прогноза ряда возможных рисков конструктивного, технологического и связанного с ними экологического характера [9]. Опыт работы рудника «Хиагда» показал, что к ним относятся, например, проникновение метеорных (атмосферных) вод в заколонное пространство в зоне мерзлых пород, в результате замерзания которых происходит смятие, повреждение или разрушение полимерных труб, разрыв резьбовых соединений, что вызывает нарушение целостности колонн [7]. Специалисты считают, что предупреждение этих рисков может потребовать улучшения гидроизоляции заколонного пространства [10], чтобы исключить возможность попадания растворов в водоносные горизонты [11]. В связи с этим отмечается тенденция роста использования полимерных труб вместо металлических в качестве колонн и обсадных труб. Однако, как показывает опыт, их проектирование и эксплуатация в условиях криолитозоны Забайкалья требуют индивидуального подхода, учитывающего не только инженерно-геокриологическую обстановку, влияние криогенных процессов и явлений, но и высокую сейсмическую активность в этом регионе [12].

Одним из элементов такого подхода можно считать используемый на руднике «Хиагда» комплекс технологических мероприятий по переходу на новую конструкцию скважин, включающий герметизацию их устья вязкоупругим полимер-

ным материалом, замену обсадных труб ПНД (из полиэтилена низкого давления) трубами из ударопрочного и морозостойкого непластифицированного поливинилхлорида, замену заколонной цементации бентонитовыми пакерами. Практический интерес представляет подход к технологии ремонта скважин, в частности восстановление геометрических размеров обсадных труб, установка резиновых пластырей, тампонаж полимерными материалами на участках нарушения гидроизоляции резьбовых соединений и целостности колонны [7].

Вместе с тем обращает на себя внимание отсутствие в научных публикациях сведений о результатах экспериментально-теоретических исследований теплового и механического взаимодействия скважины с ММП. В связи с этим требует доказательства гипотеза [7] о том, что смятие, повреждение или разрушение полимерных труб, а также резьбовых соединений происходит за счет замерзания воды в заколонном пространстве в толще ММП с нулевыми годовыми амплитудами отрицательной температуры за счет некоего резкого перепада температур в ходе эксплуатации скважин. Фактически резкие перепады температуры в течение всего годового и сезонных климатических циклов проявляются исключительно в атмосфере, т. е. над поверхностью пород. В литосфере они затухают в пределах первых десятков сантиметров сезонноталого слоя (СТС). Ниже верхней границы годовых нулевых амплитуд (т. е. ниже 10–12 м) температура толщи ММП практически постоянна. Анализ причинно-следственных связей, вызывающих повреждения полиэтиленовых обсадных труб при замерзании воды в заколонном пространстве в пределах толщи ММП, смятия или разрушения их, разрыва резьбовых соединений, обосновывает необходимость организации систематических натурных инженерно-геокриологических исследований, апробации известных методов расчета, проектирования, а также разработки эффективных технических решений, повышающих надежность геотехнологических скважин.

Методика. Достоверное определение полей температуры в условиях распространения ММП в зонах размещения скважин обеспечивается решением задачи термодинамики по методике [13]. Применяемые в составе расчетной модели уравнения теплового баланса и баланса влаги учитывают особенности переноса тепла и влаги, связанные с наличием двух фронтов промерзания. В используемой математической модели предусмотрена корректировка с течением времени теплофизических характеристик пород.

Оценка напряженно-деформированного состояния трубы из полимерного материала базируется на использовании трехмерной модели, позволяющей с достаточной для инженерных расчетов точностью определить внутренние усилия в трубе методом конечных элементов с помощью программного комплекса «ЛИРА». Такой подход позволяет производить расчет трубы на прочность и устойчивость в условиях ее сжатия льдом в замкнутом пространстве.

Методика оценки устойчивости обсадной трубы на действие касательных сил пучения [14] включает определение глубины сезонного промерзания пород, их физико-механических свойств, нормативной касательной силы пучения, которая измеряется в результате специальных исследований, а в случае их отсутствия определяется расчетом. Устойчивость обсадной трубы оценивается из условия предельного равновесия.

Методика оценки сил негативного трения оттаивающего массива ММП [15] включает определение физико-механических свойств, коэффициентов оттаивания и сжимаемости, значений температуры пород в зоне их взаимодействия со скважиной по всей ее глубине.

Оценка сейсмической опасности площадки рудного поля реализуется способом сейсмического микрорайонирования с учетом изменчивости сейсмических свойств пород в конкретных геокриологических условиях.

Результаты. В связи с изложенным предлагается комплекс мероприятий по обеспечению надежности геотехнологических скважин при освоении месторождений полезных ископаемых методом СПВ в криолитозоне на стадии проектирования, который должен включать следующие работы:

1. Инженерно-геокриологические изыскания на территории рудного поля, включающие определение физико-механических свойств пород СТС и ММП согласно СП 47.13330.2016. *Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.* В районах с повышенной сейсмической активностью необходима разработка геокриологической карты, учитывающей сейсмическое микрорайонирование рудного поля [12], изучение и использование накопленного опыта в смежных отраслях [16].

2. Теплотехнический расчет по известным методикам, например [13], с целью определения температурного поля в заколонном пространстве и контактирующих с ним СТС и толще ММП.

Теплотехнический расчет должен производиться:

– на минимально и максимально допустимые значения температуры теплоносителя в колонне (проектные) при минимальных среднезимних значениях температуры пород СТС и температуры толщи ММП;

– для периодов монтажа, начала и окончания эксплуатации, аварийной остановки и ремонта скважины.

Результаты расчета обеспечивают оценку возможности замерзания воды в заколонном пространстве на основных стадиях эксплуатации скважины и возможность определения максимально безопасного срока ее аварийной или плановой остановки, а также уточнение характеристик температурного режима рудного поля для назначения в его пределах оптимального расстояния между геотехнологическими скважинами по температурному признаку.

3. Расчет колонны на прочность и устойчивость при обжатию льдом из заколонного пространства.

В качестве исходного условия принимается допущение, что замерзание воды вокруг колонны происходит в замкнутом пространстве, т. е. без возможности бокового расширения, что приводит к обжатию колонны за счет увеличения объема воды на 9 % при фазовом переходе воды в лед.

С учетом известных величин деформаций, вызываемых замерзанием воды в заколонном пространстве, определяется внешнее давление на трубу и кольцевые усилия, создаваемые в ее стенках. При этом деформации стенок скважины в мерзлых породах не учитываются.

Величина критического давления, способного привести к потере устойчивости конструкции, вычисляется по известным формулам [17]. Если сжимающее напряжение в стенках трубы меньше предела пропорциональности материала, критическое давление определяется по формуле

$$P_{кр} = \frac{Eh^3}{4(1-\nu^2)R^3},$$

где E – модуль Юнга; h – толщина стенки трубы; R – радиус трубы; ν – коэффициент Пуассона.

Применение для расчетов метода конечных элементов [18] дает результат, удовлетворяющий требованиям точности инженерных расчетов. На основе расчетов авторами настоящей статьи выполнялась оценка зависимости несущей способности колонны от ее диаметра, толщины слоя льда в заколонном пространстве

и от характеристик материала. Определялось сочетание параметров, которые могут приводить к потере устойчивости колонны или к ее разрушению. В ходе исследований было установлено, что пластмассовые трубы диаметром от 90 до 160 мм теряют устойчивость при замерзании воды в затрубном пространстве при образовании прослоек льда толщиной 20 мм.

4. Расчет обсадной трубы на устойчивость и прочность, а также на действие касательных сил криогенного пучения при промерзании СТС (в случае отнесения слагающих дисперсных пород к категории пучинистых).

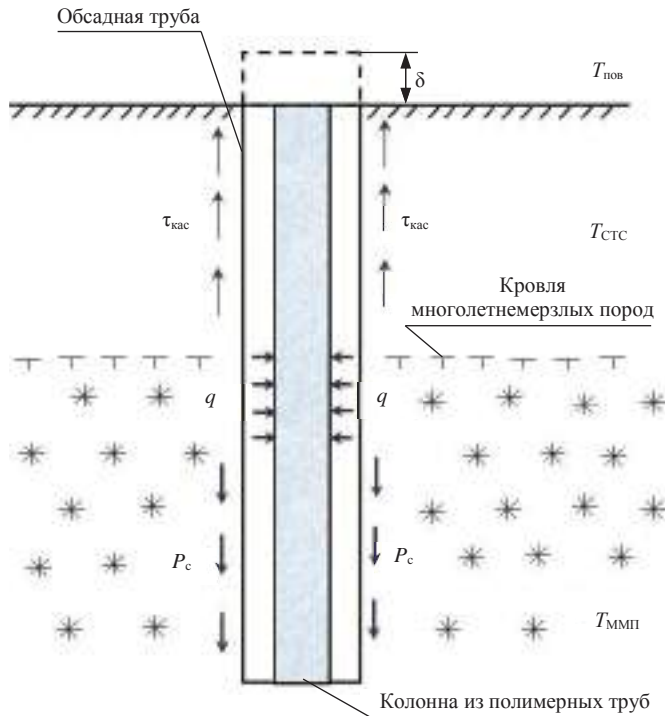


Рис. 1. Схема обсадной трубы с колонной:

$\tau_{\text{кас}}$ – касательная сила криогенного пучения; P_c – сила смерзания обсадной трубы с многолетнемерзлой породой; $T_{\text{пов}}$ – температура на поверхности пород; $T_{\text{СТС}}$ – температура сезонноталого слоя; $T_{\text{ММП}}$ – температура многолетнемерзлых пород; δ – величина криогенного выпучивания обсадной трубы; q – нагрузка на колонну при обжатии льдом

Fig. 1. A scheme of a casing pipe with a string:

$\tau_{\text{кас}}$ – tangential forces of cryogenic heaving; P_c – adfreezing force of the casing pipe and permafrost; $T_{\text{пов}}$ – the temperature at the surface of rock; $T_{\text{СТС}}$ – the temperature of the seasonally-thawed layer; $T_{\text{ММП}}$ – the temperature of the permafrost; δ – the height of the casing pipe cryogenic heaving; q – load on a string when it is compressed by ice

Расчетная схема основывается на условии предельного равновесия аналогичной модели ненагруженной сваи без учета ее собственной массы, устойчивость которой соблюдается для определенной безопасной глубины [14]. Схема взаимодействия обсадной трубы с СТС и ММП показана на рис. 1. По результатам расчета уточняется глубина погружения обсадной трубы, гарантирующая непроникновение подземных вод в заколонное пространство снизу в случае ее выпучивания (перемещения нижнего торца обсадной трубы вверх выше отметки уровня подземных вод). В случае, если допускается смерзание обсадной трубы с породой, производится расчет трубы и соединяющих ее элементов, например резьбовых,

на растяжение. На основании расчетных показателей разрабатываются мероприятия по предотвращению криогенного выпучивания обсадной трубы касательными силами пучения.

5. Расчет обсадной трубы в оттаивающих и оттаявших многолетнемерзлых дисперсных породах сливающегося или несливающегося типа на действие сил негативного (отрицательного) трения на боковой поверхности ненагруженной трубы по методике, изложенной в работе [15].

В этом случае расчетная схема принимается как для ненагруженной полый сваи круглого сечения без учета ее собственной массы. По результатам расчета уточняется отметка верхнего обреза обсадной трубы, гарантирующая недопущение проникновения подземных вод в заколонное пространство сверху в случае ее осадки совместно с оттаивающим массивом горных пород. На основании расчетных показателей разрабатываются мероприятия по предотвращению осадки обсадной трубы согласно [15].

6. Расчет обсадной трубы на совместное действие касательных сил криогенного пучения промерзающего СТС и сил негативного трения оттаивающих ММП сливающегося или несливающегося типа.

7. Проект инженерно-геокриологического мониторинга температурного режима и деформаций ММП вокруг скважины и на ключевых участках рудного поля.

Выводы. Разработаны рекомендации, дополняющие положения *Норм технологического проектирования горнодобывающих предприятий методом подземного выщелачивания (СТО СРО-П 60542948 00033-2015)* и определяющие состав работ по проектированию геотехнологических, водозаборных и других скважин в условиях криолитозоны:

- расчет температурного режима ММП, вмещающих геотехнологическую скважину на период ее эксплуатации;
- расчет на устойчивость колонны из полимерной трубы на действие внешнего давления, создаваемого при замерзании воды в заколонном пространстве;
- расчет обсадной трубы на действие касательных сил криогенного пучения сезонноталого слоя дисперсных ММП;
- расчет обсадной трубы на действие сил негативного трения при оттаивании дисперсных ММП.

В регионах криолитозоны с высокой сейсмической активностью целесообразно произвести расчет геотехнологической скважины (или группы скважин) на динамические воздействия на участках рудного поля с наиболее неблагоприятным сочетанием показателей сейсмического микрорайонирования.

Обращено внимание на необходимость детальных инженерно-геокриологических (сейсмо-геокриологических) исследований и мониторинга состояния ММП в границах рудного поля в течение всего срока освоения месторождения полезных ископаемых методом скважинного подземного выщелачивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Feifei Wang, Zisheng Song, Xianghu Cheng, Huanhuan Ma. Patterns and features of global resources and production uranium. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2017. No. 94. EEMS. IOP Publishing. P. 1–7.
2. World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification. IAEA, Vienna, 2009. Printed by the IAEA in Austria. 2009. October. 126 p.
3. Макарьев Л. Б., Царук И. И. Минерально-сырьевая база урана южной окраины Сибирской платформы // Уран: геология, ресурсы, производство, 28–30 ноября 2017 г.: матер. IV Междунар. симп. М.: ВИМС, 2017. С. 60–61.
4. Westermann S., Ostby T. I., Gisasnas K., Schuler T. V., Eitzelmüller B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // The Cryosphere. 2015. No. 9. P. 1303–1319.
5. Yang Z., Li Q., Horazdovsky J., Leroy H., Marx E. Analysis of laterally loaded piles in frozen soils // Geotechnical Special Publication. 2012. (225 GSP). P. 215–224.

6. Kou Y., Shukla S. K., Mohyeddin A. Experimental investigation for pressure distribution on flexible conduit covered with sandy soil reinforced with geotextile reinforcement of varying widths // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. No. 80. P. 151–163.

7. Солодов И. Н., Гладышев А. В., Иванов А. Г. Опыт добычи урана методом СПВ в криолитозоне // *Уран: геология, ресурсы, производство*, 28–30 ноября 2017 г.: матер. IV Междунар. симп. М.: ВИМС, 2017. С. 105–107.

8. Шполянская Н. А. Вечная мерзлота Забайкалья. М.: Наука, 1978. 132 с.

9. Ширапова С. Д. Экологические последствия опытно-промышленной добычи урана в криолитозоне способом подземного выщелачивания // *Вестник Бурятского университета. География, геология*. Вып. 3. Улан-Удэ: Бурятский гос. ун-т, 2004. С. 11–20.

10. Сушко С. М., Асанов Н. С., Карманов Т. Д., Калиев Б. З., Кадыров Ж. Н., Кочетков А. В. Метод гидроизоляции затрубного пространства при сооружении геотехнологических скважин для подземного выщелачивания продуктивного горизонта // *Международный журнал экспериментального образования*. 2013. № 11. Ч. 2. С. 118–122.

11. James A. Saunders, Bruce E. Pivetz, Nathan Voorhies, Richard T. Wilkin. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites // *Journal of Environmental Management*. 2016. No. 183. P. 67–83.

12. Железняк И. И., Черных Е. Н., Чечельницкий В. В. Исследование сочетания сейсмических и геокриологических условий для Северного Забайкалья // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2017. № 5. С. 21–25.

13. Стетюха В. А. Оценка эффективности природоохранных технологий при ведении горных работ в условиях многолетнемерзлых пород // *Известия вузов. Горный журнал*. 2006. № 6. С. 43–50.

14. Орлов В. О., Дубнов Ю. Д., Меренков Н. Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на сооружения. М.: Стройиздат, 1977. 181 с.

15. Торгашев В. В. Свайные фундаменты в условиях высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2001. 233 с.

16. Медведский Р. И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М.: Недра, 1987. 230 с.

17. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов. Более сложные вопросы и задачи. Т. 2. М.: Наука, 1965. 480 с.

18. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов. Методы, модели и алгоритмы: науч. монография. М., Берлин: Директ-Медиа, 2014. 694 с.

Поступила в редакцию 18 июня 2018 года

Для цитирования: Железняк И. И., Стетюха В. А. О проектировании геотехнологических скважин в криолитозоне Забайкалья и сопредельных регионов // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 8. С. 41–49.

Сведения об авторах:

Железняк Илья Иосифович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru

Стетюха Владимир Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и механики Забайкальского государственного университета. E-mail: intel@zabgu.ru

ON THE DESIGN OF GEOTECHNOLOGICAL WELLS IN THE CRYOLITIC ZONE OF TRANSBAIKAL AND ADJACENT REGIONS

Zhelezniak I. I.¹, Stetiukha V. A.²

¹ Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology, Siberian Branch of RAS, Chita, Russia.

² Transbaikalian State University, Chita, Russia.

The aim of the research is to develop a methodology and work scope on wells design during the development of mineral deposits, taking into account the impact of dangerous cryogenic processes in seasonally thawed and thawing layers of dispersed rocks on their structural elements.

The relevance of the research is related to ensuring operational reliability, efficiency and safety of vertical geotechnological, water intake, and other wells in operating, emergency or temporarily shutdown condition located in the cryolithic zone of Transbaikalian and adjacent regions.

The research methodology provides for the analysis of working conditions of an operating string of polymer material in wells of various purposes, taking into account the most unfavorable climatic and

geocryological factors, characteristic, in particular, of the northern part of the Transbaikalian cryolithic zone. Evaluation of these factors influence on the string of polymer material in the well is based on the laws of thermodynamics. Additional loads caused by water freezing in a closed cavernous space, accompanied by string deformation when it is compressed by ice, are taken into account. Evaluation of the casing pipe stability against the action of the tangential forces of heaving, forces of negative friction and seismic action provides for the application of proven calculation methods obtained as a result of many years of in-situ and experimental-theoretical studies in Transbaikalian region.

Research results are presented in a form of recommendations supplementing the scope and content of works on the design of vertical geotechnological, water intake and other wells in the development of mineral deposits in arrays of permafrost.

Key words: permafrost; well; string; casing pipe; design; strength; stability.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-8-41-49

REFERENCES

1. Feifei Wang, Zisheng Song, Xianghu Cheng, Huanhuan Ma. Patterns and Features of Global Uranium Resources and Production. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, 94, 2017, EEMS, IOP Publishing, pp. 1–7.
2. World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification. IAEA, Vienna, 2009. Printed by the IAEA in Austria, October 2009. 126 p.
3. Makar'ev L. B., Tsaruk I. I. [Raw mineral base of uranium of the Siberian platform's southern rim. Proc. 4th Internat. Symp. of 28th–30th November, 2017 "Uranium: Geology, Resources, and Production"]. Moscow, Federal Agency for Subsoil Use "All-Russian Scientific Research Institution of Mineral Resources" Publ., 2017, pp. 60–61. (In Russ.)
4. Westermann S., Ostby T. I., Gisas K., Schuler T. V., Ezelmüller B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data. *The Cryosphere*, 2015, no. 9, pp. 1303–1319.
5. Yang Z., Li Q., Horazdovsky J., Leroy H., Marx E. Analysis of laterally loaded piles in frozen soils. *Geotechnical Special Publication*, 2012 (225 GSP), pp. 215–224.
6. Kou Y., Shukla S. K., Mohyeddin A. Experimental investigation for pressure distribution on flexible conduit covered with sandy soil reinforced with geotextile reinforcement of varying widths. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, no. 80, pp. 151–163.
7. Solodov I. N., Gladyshev A. V., Ivanov A. G. [An experience of producing uranium using a method of underground borehole leaching in cryolithic zone. Proc. 4th Internat. Symp. of 28th–30th November, 2017 "Uranium: Geology, Resources, Production"]. Moscow, Federal Agency for Subsoil Use "All-Russian Scientific Research Institution of Mineral Resources" Publ., 2017, pp. 105–107. (In Russ.)
8. Shpolianskaia N. A. [Permafrost of the Transbaikalian region]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 132 p.
9. Shirapova S. D. [Environmental consequences of experimental-industrial production of uranium in cryolithic zone using the method of underground leaching]. *Vestnik Buriatskogo universiteta. Geografiia, geologiiia – Buryat State University Bulletin. Geography and Geology*, issue 3. Ulan-Ude, BSU Publ., 2004, pp. 11–20. (In Russ.)
10. Sushko S. M., Asanov N. S., Karmanov T. D., Kaliev B. Z., Kadyrov Zh. N., Kochetkov A. V. [A method of waterproofing the annular space when building geotechnological wells for underground leaching of a producing horizon]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia – International Journal of Experimental Education*, 2013, no. 11, pt. 2, pp. 118–122. (In Russ.)
11. James A. Saunders, Bruce E. Pivetz, Nathan Voorhies, Richard T. Wilkin. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites. *Journal of Environmental Management*, 2016, no.183, pp. 67–83.
12. Zhelezniak I. I., Chernykh E. N., Chechel'nitskii V. V. [Research of seismic and geocryological conditions combination for the North of Transbaikalian region]. *Osnovaniia, fundamenti i mekhanika gruntov – Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, no. 5, pp. 21–25. (In Russ.)
13. Stetiukha V. A. [Efficiency estimation of environmental protection technologies when mining in the conditions of permafrost]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2006, no. 6, pp. 43–50. (In Russ.)
14. Orlov V. O., Dubnov Iu. D., Merenkov N. D. [Heaving of frozen soil and its influence on the constructions]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1977. 181 p.
15. Torgashev V. V. [Pile foundations in the conditions of high-grade permafrost]. Yakutsk, Permafrost Study Institute of SB RAS Publ., 2001. 233 p.
16. Medvedskii R. I. [Oil and gas wells construction and production in permafrost]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 230 p.
17. Timoshenko S. P. [Resistance of materials. More complex issues and tasks. Vol. 2]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 480 p.
18. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Prialov S. N. [Scientific monograph "Mathematical Modelling of Pipeline Networks and Channel Systems. Methods, Models, and Algorithms"]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2014. 694 p.

Information about authors:

Zhelezniak Il'ia Iosifovich – Doctor of Engineering Science, senior researcher of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of RAS. E-mail: lgc255@mail.ru

Stetiukha Vladimir Alekseevich – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, professor of the Department of Strength of Materials and Soil Mechanics, Transbaikal State University. E-mail: intel@zabgu.ru
