

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ В г. БЕРЕЗНИКИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

© 2016 г. В. И. Осипов*, А. А. Барях**, И. А. Санфиров**,
Ю. А. Мамаев*, А. А. Ястребов*

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д.13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: mamaev47ya@mail.ru

** Горный институт УрО РАН,
ул. Сибирская, д.78-а, Пермь, 614007 Россия. E-mail: arc@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 25.05.2015 г.

Район исследования относится к высокой категории сложности по инженерно-геологическим условиям. Здесь активно развиваются опасные геологические процессы (ОГП): высокая сейсмичность до 7 баллов по шкале MSK-64, карст, суффозия, оседание и провалы поверхности земли, подтопление и затопление территорий, эрозия, экологические процессы и другие. На территории действуют крупные промышленные предприятия с опасным производством и сложной инфраструктурой. Одно из них – Первый Березниковский калийный производственный рудник (БКПРУ-1) эксплуатировалось с 1954 г. Его шахтное поле простирается под промышленной зоной и жилыми кварталами города. В 2006 г. здесь произошла техногенная авария, приведшая к затоплению всего выработанного подземного пространства объемом более 80 млн м³ и образованию огромных провалов дневной поверхности в 2007, 2010, 2011 и 2015 гг.

На примере геологического строения территории одного из рудников Верхнекамского месторождения калийных солей рассматривается влияние двух ведущих групп геологических факторов на формирование карстовых провалов. Анализируются особенности гидродинамических условий и геомеханического строения надсолевой толщи пород, синергетика которых обуславливает разнообразие моделей возможного развития деформаций и провалов земной поверхности. В работе изложены возможные схемы развития провалов земной поверхности над выработанным пространством.

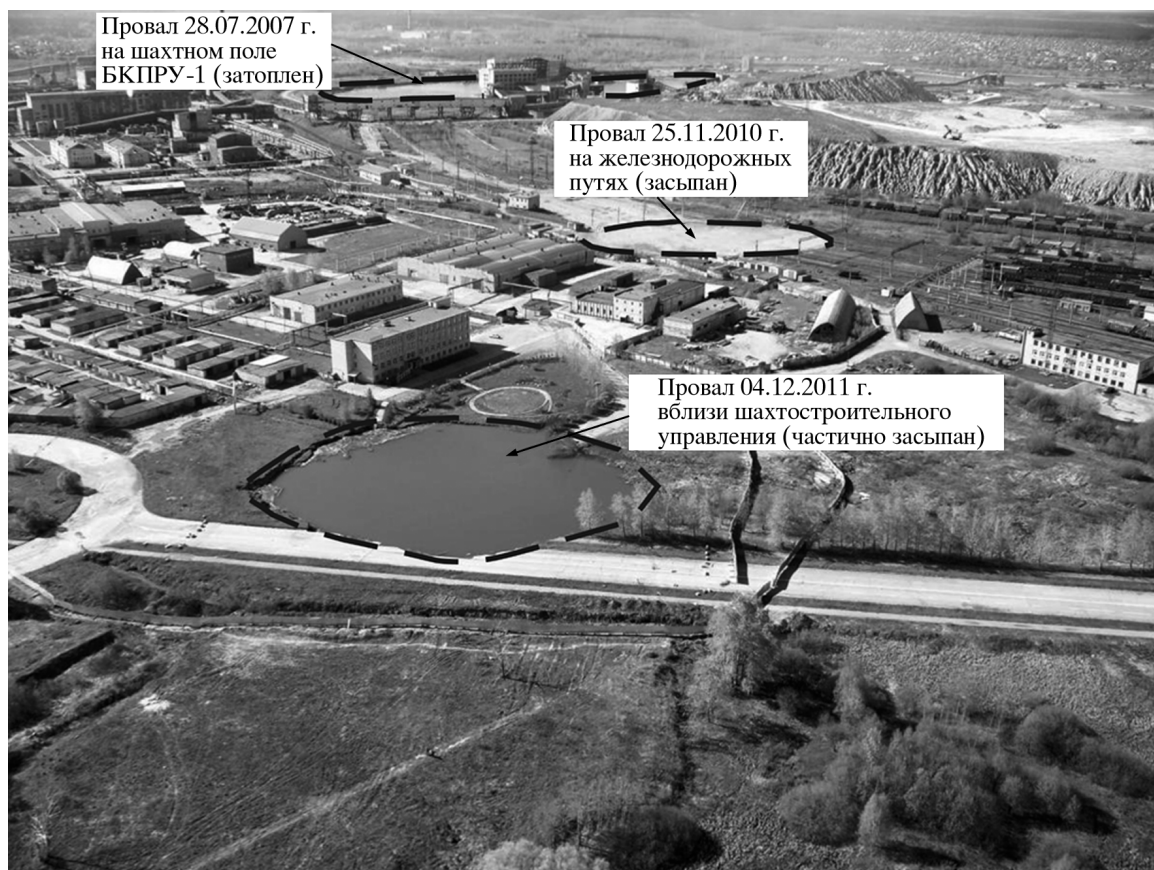
Цель выполняемых исследований – оценка и прогноз развития опасных геологических процессов на территории г. Березники на основе инженерно-геологической интерпретации имеющихся материалов геологических работ, инженерных изысканий и комплексных мониторинговых наблюдений.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, суффозионно-карстовые процессы, гидродинамические условия, геомеханическая модель, массив пород, динамика развития провалов.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ

Территория г. Березники располагается в пределах Предуральского краевого прогиба и в структурно-тектоническом отношении является областью развития разломно-блоковых структур разного масштаба (уровня) с многочисленными разновозрастными разрывными нарушениями, обновленными в период неотектонической активизации. По этим тектоническим нарушениям происходят дифференцированные по скорости и направленности движения блоков (массивов) горных пород.

Рассматриваемая территория находится в центре площади Верхнекамского месторождения калийных солей, границы которого практически совпадают с границами Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба. Строение данной структуры осложнено валлообразными поднятиями и опусканиями, а также тектоническими разломами. В частности, в границах рассматриваемой территории г. Березники выделяется положительная тектоническая структура – Березниковское поднятие, граничащая на севере с отрицательной структурой Дуринского прогиба, а



Общий план промзоны г. Березники с тремя провалами земной поверхности.

на западе – с обширной древней переуглубленной долиной Пра-Камы.

С поверхности территория сложена коренными породами верхнепермского возраста терригенной пестроцветной, терригенно-карбонатной и галогенно-карбонатной формаций. Преобладают терригенно-карбонатные отложения соликамской свиты (P_2sl_2), представленные толщей переслаивающихся мергелей, глинистых загипсованных известняков, песчаников, алевролитов и известковистых глин, трещиноватых, выветрелых, водонасыщенных, низкой и средней прочности. Мощность толщи до 150 м. На отдельных небольших участках, а именно: на северном берегу Семинского пруда и в нижнем бьефе удерживающей его плотины в долине р. Зырянка, близко к поверхности залегают породы соляно-мергельной толщи соликамской свиты, представленные мергелями с прослоями известняков, известковистых глин, гипса и каменной соли. Данные породы характеризуются низкими прочностными и деформационными свойствами, значительной растворимостью и закарстованностью. С поверхности на рассматриваемой территории широко развиты стратиграфо-генетические комплексы четвертич-

ных отложений: аллювиальные (aIV, aIII-IV, aII), пролювиальные (pIV), делювиальные (dIII-IV), делювиально-оползневые (d-dpIII-IV), элювиально-делювиальные (edII-IV), флювиогляциальные (fIII-IV) и др. Мощность четвертичных образований изменяется от 1 до 10 м, реже до 20 м.

Опасные геологические процессы и явления на рассматриваемой территории широко развиты и характеризуются большой активностью, обусловленной в том числе деятельностью человека. Здесь наблюдаются следующие процессы: подтопление и затопление территорий, осадки дневной поверхности земли над подработанным пространством в зонах размещения промышленных объектов и жилой застройки, суффозионно-карстовые процессы с образованием на поверхности воронок и крупных провалов (рисунок). Высокая сейсмичность территории (до 7 баллов) обусловлена как естественными блоковыми тектоническими подвижками, так и горными работами в горнодобывающей, нефтяной и газовой отраслях. В районе отмечается наведенная сейсмичность (до 3–4 баллов) при горных ударах, обрушениях кровли выработок, провалах поверхности, технологических взрывах. Длительно развивающийся

процесс на рассматриваемой территории – гипергенез в толщах пород пермского возраста, залегающих с поверхности, приводит к изменению состава, состояния и свойств горных пород в результате их разуплотнения, трещинообразования, физического и химического выветривания, выщелачивания. По геофизическим данным установлена примерная мощность зоны гипергенеза около 90 м от поверхности, а по сильно трещиноватым зонам крупных тектонических нарушений она может достигать первых сотен метров.

Наиболее опасны на рассматриваемой территории суффозионный и карстовый процессы. В геологическом разрезе территории встречены все типы карста: карбонатный, сульфатный и галогенный. Первый тип наблюдается в породах терригенно-карбонатной толщи верхнепермских отложений. Второй и третий типы – в соляно-мергельной и соляной толщах. Современный карстовый процесс наиболее интенсивно протекает в зоне годовых циклических колебаний уровней речных и подземных вод. На его активизацию оказывает влияние хозяйственная деятельность человека, в частности интенсивный водозабор. На рассматриваемой территории активность карстово-суффозионных процессов значительно возросла в 2006–2008 гг. в связи с аварией на руднике БПКРУ-1, когда в течение двух лет существовал активный вертикальный промывной режим всей надсоляной толщи, обусловленный огромными притоками до 8000 м³/час в подземные шахтные выработки.

Современная активность карстового процесса на рассматриваемой территории высокая, так как за сравнительно короткое время отмечены случаи деформаций (оседаний и провалов) земной поверхности и расположенных здесь зданий и сооружений [2]. Очевидно, мы имеем дело с суффозионно-карстовыми процессами, активизация которых спровоцирована и усилена хозяйственной деятельностью человека, а именно: созданием подземных выработок сверхбольшого объема, условий постоянного обводнения карстующихся пород, высоких градиентов фильтрации в процессе техногенной аварии 2006 г., сильного химического загрязнения геологической среды. По сути, это новый генетический тип (техногенно-обусловленный) карстового процесса, скорость развития которого (активность) может значительно (в десятки раз) превышать природные аналоги.

Структура и механизм взаимодействия отдельных горизонтов и комплексов подземных вод, имеющих разный химический состав, минерализацию, режимы движения и динамические харак-

теристики потоков, весьма сложные [7]. Присутствие в геологическом разрезе территории толщ водорастворимых пород: карбонатных, сульфатных и галогенных, обуславливает широкое развитие карстового процесса.

Карстом горные породы поражены значительно глубже современного базиса эрозии – долины р. Камы, так как огромную роль в его развитии играла и играет переуглубленная древняя (N_2-Q_3) долина Пра-Камы глубиной более 100 м относительно современного русла реки. В бортах этой долины карст развивался и развивается на всех этапах геологической истории территории, начиная с миоцена (N_1). Карст представлен разными поверхностными и подземными формами. К поверхностным проявлениям карстово-суффозионных процессов относятся воронки, котловины, рвы, участки значительных просадок и провалов земной поверхности. Подземные карстовые формы – полости, зоны разрушенных трещиноватых брекчевидных пород и доломитовой муки, встречены горными выработками на глубинах от 8 до 250 м. К ним также относятся многочисленные литогенетические и тектонические трещины, расширенные выщелачиванием.

Можно предположить, что воздействие всех перечисленных выше природно-техногенных факторов развития территории привело к тому, что вся надсоляная толща горных пород с выделяемыми по петрографическому составу отдельными толщами (терригенно-карбонатная, соляно-мергельная, частично соляная) превратилась в дисконтиниум – массив горных пород, состоящий из блоков, пакетов, плит разного объема слабосцементированных растворимых (промытых), сильно измененных, трещиноватых, выщелоченных, макропористых, закарстованных, проницаемых пород с ослабленными структурными связями и значительно сниженными показателями прочности и деформируемости.

Предварительный инженерно-геологический анализ результатов определения физико-механических свойств горных пород, слагающих территорию г. Березники, не позволил установить закономерности их изменений в зависимости от петрографического состава и/или глубины залегания в пределах зоны гипергенеза, что подтверждается близкими значениями показателей свойств образцов горных пород, отобранных с разных глубин и мест опробования на потенциально провалоопасных участках территории.

Профильные геофизические исследования показали, что выявленные совокупности характерных изменений параметров волновых картин

и удельных сопротивлений и их количественные значения обуславливаются структурными особенностями исследуемого интервала геологического разреза, а также сложной разветвленной сетью фильтрационных потоков. Установлена приповерхностная зона гипергенно измененных пород, имеющая глубину распространения 80–90 м, которая условно может быть разделена на две подзоны, а именно: верхнюю – более выветрелых трещиноватых и выщелоченных пород, мощностью 35–40 м со скоростями распространения продольных упругих волн $V_p = 1000–1500$ м/с, и нижнюю – менее измененных пород, имеющую скорости $V_p = 1600–2000$ м/с.

На геофизических профилях установлены участки и зоны структурных нарушений геологической среды (повышенной трещиноватости пород), очевидно, тектонической природы, а также участки инфлюации (втоков) и перетоков фильтрационных потоков разной направленности с преобладанием вертикальной и горизонтальной составляющих.

Выполненный на этом же участке комплексный каротаж скважины в интервале глубин 20–80 м позволил получить количественные значения показателей, характеризующих строение и состояние (качество) геологической среды.

Наиболее информативны для целей инженерной геологии графики изменений с глубиной следующих параметров: влагосодержание; скорости продольных и поперечных акустических волн; плотность горных пород; пористость пород и пустотность толщи; интенсивность трещиноватости; диаметр ствола скважины; количество и пространственное положение основных водопроявляющих (сильно фильтрующих) интервалов, а также приближенные значения динамических деформационных характеристик. Все полученные характеристики установлены для зоны гипергенного изменения пород процессами выветривания, разгрузки, выщелачивания и др.

Имеющиеся данные показывают, что влагосодержание глинистых известняков, преобладающих в геологическом разрезе участка, по градиентной зависимости изменяется от 45 до 60%, что указывает на их водонасыщенное состояние.

Объемный вес (плотность влажного грунта) известняков увеличивается с глубиной от 2.1 до 2.5 г/см³. Общая пористость пород в верхней части гипергенной зоны – до глубин 35–40 м изменяется от 35 до 45%, редко 48%, а глубже колеблется от 27 до 38%. При этом пустотность толщи может достигать в верхней части 68% и

больше, а в нижней (более сохранной) не превышает 46–48%.

Интенсивность трещиноватости пород по боковому каротажу составляет в верхней подзоне более 10 у.е., а в нижней колеблется в пределах 4–5 у.е., т.е. в 2 раза меньше.

В процессе бурения скважин отмечались случаи вывалов пород из стенок стволов скважин. При бурении установлено, что до глубин 35–40 м диаметр скважин менялся от 140 до 170 мм, а ниже изменения диаметра составляли 132–140 мм.

В геологическом разрезе скважин в интервалах глубин 20–80 м были установлены интервалы сильно водопроявляющих пород, при опробовании которых дебиты интервалов колебались от 12 до 20 м³/сут.

Важно отметить, что показанные выше закономерности изменений с глубиной отдельных показателей, характеризующих строение и состояние надсоляной толщи, существенно не отражаются на значениях физико-механических свойств горных пород, определенных на образцах, что подтверждается результатами их лабораторных испытаний.

Данные выводы хорошо согласуются с концептуальными положениями работ Ч. Джексона [4], В. Витке [3], А.Г. Оловянного [5] и других, которые занимались разработкой геомеханических моделей и оценкой напряженно-деформированного состояния массивов скальных пород сложного геологического строения. В соответствии с их выводами массивы скальных горных пород – дискретные, анизотропные, неоднородные среды, обладающие начальным напряженным состоянием. При этом слоистые массивы, сложенные чередующимися слоями горных пород с разными физико-механическими свойствами, могут рассматриваться как сплошные среды с анизотропными прочностными и деформационными свойствами.

Из сказанного следует, что для целей разработки геомеханических моделей геологической среды можно допустить, что в объемах отдельных крупных блоков, ограниченных тектоническими разломами, трещиноватые водонасыщенные породы могут рассматриваться как однородные изотропные среды с более низкими значениями прочностных и деформационных свойств, по сравнению с образцами. В целом такая квазидискретная среда может обладать достаточно большой жесткостью при действии нормальных сжимающих сил и быть более податливой к действию сдвигающих сил.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАССИВОВ ПОРОД НА УЧАСТКАХ РАЗВИТИЯ ПРОВАЛОВ

Над подземными горными выработками большого размера формируются достаточно объемные зоны измененного напряженно-деформированного состояния горных пород, в пределах которых напряжения меняются со сжимающих (геостатических) на растягивающие, действующие на и вблизи поверхности выработок. При разрушении горных пород вокруг выработок вместе с развитием трещин меняются деформационные характеристики массива пород, включающего сплошные участки относительно сохранных блоков и пакетов пород и зоны нарушений. Развитие деформаций в этих зонах приводит в дальнейшем к формированию куполов обрушения над выработками. При этажном (друг над другом) расположении последних могут развиваться весьма сложные по конфигурации зоны разрушений в массивах горных пород, которые при условии не очень глубокого залегания подземных выработок могут достигать земной поверхности, образуя участки оседаний и провалы [1].

Механизмы разрушения разблоченных сильно трещиноватых массивов скальных и полускальных горных пород значительно сложнее, чем в дисперсных грунтовых толщах. Часто вблизи поверхности скальных массивов (до глубин 15–20 м) релаксация естественных напряжений приводит к образованию трещин, параллельных этой поверхности, которые накладываются на литогенетические трещины, увеличивая общую пустотность массивов.

В процессе исследований сделана попытка охарактеризовать особенности и факторы развития процессов механического размыва (суффозии), выщелачивания и переноса терригенно-карбонатных пород надсоляной толщи. На рассматриваемой территории Березниковского промышленного района данные породы (мощностью до 150 м) залегают с поверхности под чехлом рыхлых четвертичных отложений разного генезиса и небольшой (до 15, редко 20 м) мощности. Именно в толще терригенно-карбонатных пород над выработанным подземным пространством рудника БКПРУ-1 отмечаются значительные (до 4.5 м) деформации земной поверхности, и происходят провалы больших объемов. Очевидно, что эти катастрофические явления обусловлены активным проявлением суффозионных и карстовых процессов в зоне гипергенных (вторичных) изменений в верхней части толщи. Их активизации способствуют также процессы разгрузки

напряжений, трещинообразования, химического, физического и биологического выветривания, а также выщелачивания и механического выноса грунтовых частиц подземными водами. Базисами эрозии суффозионно-карстовых процессов на рассматриваемой территории являются не только современные долины р. Кама и ее притоков, но и расположенная в непосредственной близости от промзоны города древняя переуглубленная долина Пра-Камы.

Разный петрографический состав переслаивающихся горных пород их тектоническая раздробленность, высокая трещиноватость и выветрелость в зоне гипергенеза обуславливают их значительную неоднородность. По данным гранулометрического анализа коэффициент неоднородности отдельных горизонтов горных пород колеблется от 3 до 100 и более. При значении коэффициента неоднородности более 20 породы считаются неоднородными и суффозионно-опасными. Таким образом, можно заключить, что горные породы отдельных зон и горизонтов терригенно-карбонатной толщи супернеоднородны и сверхсуффозионно опасны.

По нормативным данным, в толщах неоднородных пород суффозия может развиваться уже при градиентах напора подземных вод больше 5. В случаях аварий 2006, 2010, 2011 гг. при изменении природных гидродинамических условий градиенты напора достигали значений 200–250, что в десятки раз превышает нормативные значения градиентов, при которых начинает развиваться механический размыв и вынос грунтовых частиц [1, 7]. В этом случае можно говорить о внутренней эрозии – перемещении и выносе почти всех фракций несвязной рыхлой породы, в том числе заполнителя трещин, в существующие карстовые полости больших размеров или в полости, образующиеся в ходе самого процесса за счет выщелачивания пород в стенках полостей и трещин.

Следует отметить, что все случившиеся на данной территории провалы, а именно: провалы 2007, 2010, 2011 и 2015 гг. на шахтном поле БКПРУ-1 происходили в толщах терригенно-карбонатных пород, в зонах влияния крупных тектонических нарушений и имели глубину 80–90 м, при том, что шахтные выработки располагались на значительно больших глубинах (около 250 м) [6]. А как было отмечено выше, нижняя граница зоны гипергенеза коренных пород, по данным бурения и геофизики, располагается также на глубинах 80–90 м. Ниже залегают относительно сохранные, менее выветрелые и трещиноватые породы.

Особое значение в массивах горных пород надсоляной толщи имеют зоны крупных тектонических нарушений, характеризующиеся высокой трещиноватостью, раздробленностью и проницаемостью пород. Эти зоны представляют собой пути сосредоточенной фильтрации и каналы проникновения агентов выветривания пород, а также химических загрязняющих элементов. В пространственном отношении общее направление фильтрационных потоков было и остается направленным вниз, в сторону современной долины р. Камы, к основанию ее древней переуглубленной долины и еще глубже – к зонам втока в подземные шахтные выработки большого объема.

Одна из возможных гипотетических схем формирования провалов на территории г. Березники предполагает, что нарушение сплошности водозащитной толщи над подземными горными выработками, обусловленное изменением напряженно-деформированного состояния массивов пород, ослабленных шахтами, привело к развитию во всей выше залегающей толще повышенной трещинной пустотности и длительной (более двух лет) вертикально направленной вниз фильтрации с большими скоростями и объемами втока в подземные выработки.

Это определило активное развитие во всей надсоляной толще, особенно в ее гипергенно измененной части, суффозионных и карстовых процессов. Интенсивная вертикальная промывная фильтрация наложилась на природный процесс формирования карстовых полостей в мощной зоне гипергенеза древних пермских отложений. Причем карстовый процесс существенно активизировался из-за сильного химического загрязнения подземных вод выбросами, выпусками и отходами промышленных предприятий. Таким образом, в надсоляной толще сравнительно быстро сформировались карстовые полости и разветвленные протяженные карстово-суффозионные каналы, заложенные по крупным тектоническим и литогенетическим трещинам. Над этими сильно закарстованными массивами пород, в пределах зоны гипергенеза, образуются крупные мульды оседания и провалы земной поверхности больших объемов.

Существуют и другие гипотетические схемы формирования провалов в надсоляной толще. Одна из них допускает, что длительная интенсивная вертикальная фильтрация при затоплении подземных выработок, обуславливающая растворение и суффозию пород надсоляной и водозащитной толщ, приводит к растворению и ослаблению целиков и стен камер в ослабленной зоне сильвинито-карналлитовой толщи и формированию

свода обрушения над подземными выработками, который продвигается от подземных выработок вверх с выходом на поверхность в виде провала.

Другая схема исходит из того, что развитие провала протекает по типу работы песочных часов, когда идет встречное развитие процессов, а именно: снизу вверх – рост свода обрушения над подземными выработками, и сверху вниз – усиление (увеличение объемов и скоростей) карстово-суффозионных и деформационных процессов в гипергенно измененной толще пород. В заключительной стадии происходит расширение контактной области развития встречных процессов с обрушением масс горных пород и образованием провала.

Можно допустить, что на рассматриваемой территории все приведенные выше схемы развития провалов над подземными выработками могут иметь место. Это зависит от того или иного сочетания природных геологических и техногенных факторов. Данные схемы рассматривают только возможные механизмы и динамику процессов образования провалов, не касаясь вопросов разработки геомеханических моделей, выбора расчетных схем допредельного напряженно-деформированного состояния массивов пород или схем процессов их разрушения, с выбором, соответственно, деформационных или прочностных показателей свойств пород в массиве.

Дальнейшие мониторинговые и аналитические работы, включая выполнение модельных исследований напряженно-деформированного состояния массивов горных пород на провалоопасных участках, могут дать более обоснованные прогнозные оценки опасности развития деформаций и провалов земной поверхности на территории г. Березники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов / Кол. авт.: С.Н. Власов, А.В. Маковский, В.Е. Меркин и др. М.: ТИМР, 2000. 195 с.
2. Борзаковский Б.А., Мараков В.Е., Теннисон Л.О. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО “Уралкалий” на городскую и промышленную застройку г. Березники // Горный информ.-аналит. бюл. 2009. № 7. С. 381–396.
3. Виттке В. Механика скальных пород. М.: Недра, 1990. 439 с.
4. Джеггер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. 255 с.
5. Оловянный А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб.: ФГУП “Межотраслевой научн. центр” ВНИМИ; ООО “Стресс”, 2003. 234 с.

6. Осипов В.И., Барях А.А., Санфиров И.А., Маммаев Ю.А., Ястребов А.А. Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // *Геоэкология*. 2014. № 4. С. 356–361.
7. Трофимов В.И., Кочнева М.Н. Гидрогеологическое прогнозирование карстовых процессов на шахтном поле БКПРУ-1 ОАО “Уралкалий” // *Горное эхо*. Пермь: ГИ УрО РАН, 2012. Вып. 2. С. 33–45.
3. Vittke, V. *Mekhanika skal'nykh porod* [Hard rock mechanics]. Moscow, Nedra, 1990, 439 pp. (in Russian).
4. Jagger, Ch. *Mekhanika gornykh porod i inzhenernye sooruzheniya* [Rock mechanics and engineering structures]. Moscow, Mir Publ., translated from English. 1975, 255 pp. (in Russian).
5. Olovyanyni, A.G. *Nekotorye zadachi mekhaniki massivov gornykh porod* [Some tasks in rock massifs mechanics]. St. Petersburg, FGUP “Mezhotraslevoi nauchnyi tsentr” VNIMI, ООО “Stress”, 2003, 234 p. (in Russian).
6. Osipov, V.I., Baryakh, A.A., Sanfirov I.A., Mamaev Yu.A., Yastrebov A.A. *Karstovaya opsnost' pri zatoplenii kaliinogo rudnika v g. Berezniki Permskogo kraya RF* [Karst hazard on flooding potassium mine in Berezniki town, Perm krai, Russian Federation]. *Geoekologiya*, 2014, no. 4, pp. 356–361 (in Russian).
7. Trofimov, V.I., Kochneva M.N. *Gidrogeologicheskoe prognozirovanie karstovykh protsessov na shakhtnom pole BKPRU-1 OAO “Uralkalii”* [Hydrogeological prediction of karst processes in mining field of BKPRU-1 “Uralkalii” JSC]. *Gornoe ekho*. Perm, GI UrO RAN, 2012, issue 2, pp. 33–45 (in Russian).
1. *Avariinnye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonnelei i metropolitenov* [Emergencies in construction and operation of transport tunnels and metro]. S.N. Vlasov, A.V. Makovskii, V.E. Merkin, et al. Moscow, TIMR Publ., 2000, 195 p. (in Russian).
2. Borzakovskii, B.A., Marakov, V.E., Tennison, L.O. *Prognoz negativnogo vliyaniya zatopleniya rudnika BKPRU-1 OAO “Uralkalii” na gorodskuyu i promyshlennuyu zastroyku g. Berezniki* [Prediction of undesirable impact of flooding BKPRU-1 mine (Uralkalii JSC) flooding]. *Gorn. inform.-analit. byull.*, 2009, no. 7, pp. 381–396 (in Russian).

REFERENCES

HYDROGEOMECHANICAL CONDITIONS OF KARST SINKHOLE FORMATION IN THE AREA OF POTASSIUM MINES IN BEREZNIKI TOWN, PERM KRAI

V. I. Osipov*, A. A. Baryakh, I. A. Sanfirov**, Yu. A. Mamaev*, and A. A. Yastrebov***

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: mamaev47ya@mail.ru

**Mining Institute, Ural Division, Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya 78a, Perm, 614007 Russia.
E-mail: arc@mi-perm.ru

The investigated area is specified by highly complex engineering geological conditions. Hazardous geological processes develop intensely there, i.e., high seismicity (up to 7 points by MSK-64 scale, karst, suffusion, land subsidence and collapses, waterlogging and flooding, erosion, contamination, etc. Large industrial enterprises with environmentally hazardous production and complex infrastructure are in operation in this area. One of such enterprises, i.e., the First Berezniki Potassium Production Mine (BKPRU-1) was in operation since 1954. Its mining field spreads both beneath the industrial zone and the residential area of the town. In 2006, the technogenic accident happened there, which resulted in the flooding of entire mined-out subsurface space of a total volume more than 80 mln m³ and in the formation of huge sinkholes on the surface in 2007, 2010, 2011, and 2015.

The role of two leading groups of geological factors in the formation of karst sinkholes is studied by the example of geological structure of one mine area within the Verkhnekamskoe potassium deposit. The specific hydrodynamic conditions and geomechanical structure of the rock massif overlying the salt body are analyzed, the synergy of which causes various scenarios of possible deformation and collapse development. The paper discusses the possible scenarios of sinkhole development at the surface above the mined-out space.

The research is aimed at the assessment and prediction of the development of hazardous geological processes in Berezniki town on the basis of engineering geological interpretation of the available geological data, results of engineering survey and combined monitoring observation.

Keywords: *engineering geological conditions, suffusion and karst processes, hydrodynamic conditions, geomechanical model, rock massif, collapse development dynamics.*