УДК 622.831

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УЧАСТКЕ ПРОРЫВА ПРЕСНЫХ ВОД В КАЛИЙНЫЙ РУДНИК

А. А. БАРЯХ[1], *директор, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук*
С. Ю. ДЕВЯТКОВ[2], *ведущий инженер, sd@mi-perm.ru*

[1] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия*
[2] *Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия*

Методами математического моделирования разработан механизм прогноза образования провалов.

Ключевые слова: *затопление рудников, провалы, растворение солей, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, разрушение водотолщи.*
DOI: *10.17580/gzh.2018.06.03*

Введение

Разработка месторождений водорастворимых руд возможна только при сохранении целостности водоупорного целика, отделяющего выработанное пространство рудника от водоносных горизонтов и называемого водозащитной толщей (ВЗТ). Поэтому выбор системы и технологических параметров разработки соляных месторождений напрямую связан с обеспечением сохранности ВЗТ как во время эксплуатации рудника, так и вплоть до окончания процесса сдвижения земной поверхности.

Нарушение сплошности ВЗТ вызывает прорыв пресных или слабоминерализованных вод в горные выработки. В связи с высокой растворимостью минеральных солей происходит размыв трещин, что ведет к дальнейшему увеличению водопритока, который становится неконтролируемым. Зачастую это приводит к полному затоплению рудника и его ликвидации. Многочисленные примеры аварий, связанных с водопритоками в соляные шахты в разных странах мира, свидетельствуют о том, что совершенствование методов и способов разведки и эксплуатации месторождений не позволяет полностью исключить опасность прорыва надсолевых вод в горные выработки.

К одним из основных негативных последствий затопления калийных рудников относится интенсификация процесса деформирования подработанного породного массива [1, 2], вызванного растворением соляных пород. При этом образование провала в месте прорыва вод, как правило, является «стандартным» последствием и сопровождает аварии на всех калийных рудниках и соляных шахтах. Провал, как явление, представляет собой переход статических деформаций массива, проявляющихся в виде оседаний земной поверхности, в динамическую форму – обрушение. Размеры провалов могут достигать сотен метров, а их формирование представляет реальную угрозу безопасной жизнедеятельности территорий, приводит к значительным финансовым убыткам и негативным социально-экономическим и экологическим последствиям [3–9]. В связи с этим определение времени и условий образования провала на участке прорыва пресных вод в горные выработки является важной геомеханической задачей, направленной на минимизацию негативных последствий аварийных затоплений калийных рудников.

Содержательная постановка задачи

В случае нарушения сплошности ВЗТ и образования сквозной области трещиноватости, простирающейся от водоносных горизонтов до отработанных пластов, происходит формирование каналов проникновения надсолевых пресных вод в горные выработки. С течением времени вследствие растворения верхней части соляной толщи на относительно небольших по площади участках наблюдается интенсификация оседаний земной поверхности. В этих случаях формируются мульды сдвижения с высокими градиентами оседаний, которые увеличиваются со временем. Согласно проведенным геомеханическим расчетам [10–12], данный процесс объясняется образованием локальных зон, ослабленных по прочностным и деформационным свойствам в интервале надсоляной толщи. Необходимо отметить, что наличие подобных зон подтверждается данными сейсморазведки и результатами бурения инженерно-геологических скважин.

На первом этапе математического моделирования выполняли оценку предельных размеров водопроводящего канала, предшествующего образованию провала. В расчетную схему в предполагаемом месте образования сквозной зоны техногенной нарушенности в ВЗТ включали водопроводящий канал, в первом приближении цилиндрической формы, и ослабленная зона, развитая в верхней части геологического разреза (**рис. 1**). В процессе итерационной процедуры решения радиус канала увеличивался за счет растворения соляных пород. Одновременно производилось поэтапное расширение «ослабленной» области вследствие развития зон пластичности, которые трактовали как места разрушения надсоляной толщи.

Математическое моделирование эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанного массива в процессе прорыва пресных вод проводили в трехмерной упругопластической постановке. При этом учитывали основные особенности строения массива, действие массовых сил, интенсивность γ_i которых опреде-

© Барях А. А., Девятков С. Ю., 2018

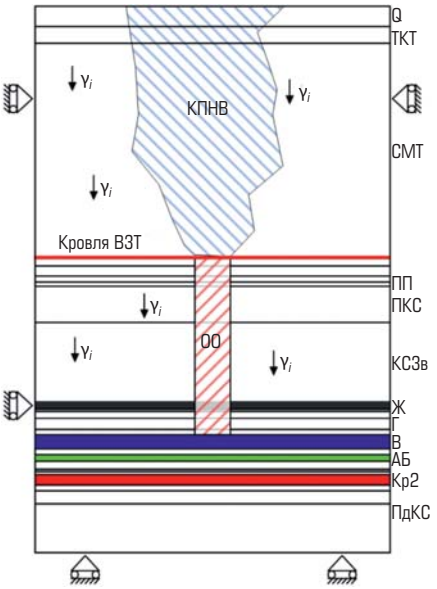

Рис. 1. Принципиальная схема геомеханических расчетов: КПНВ – канал проникновения надсолевых вод; ОО – ослабленная по прочностным свойствам область; γ_i – интенсивность массовых сил; Q – четвертичные отложения; ТКТ – терригенно-карбонатная толща; СМТ – соляно-мергельная толща; ПП – переходная пачка; ПКС – покровная каменная соль; КСЗв – зона замещения каменной солью; Ж, Г, В – карналлитовые пласты; АБ, Кр2 – сильвинитовые пласты; ПдКС – подстилающая каменная соль

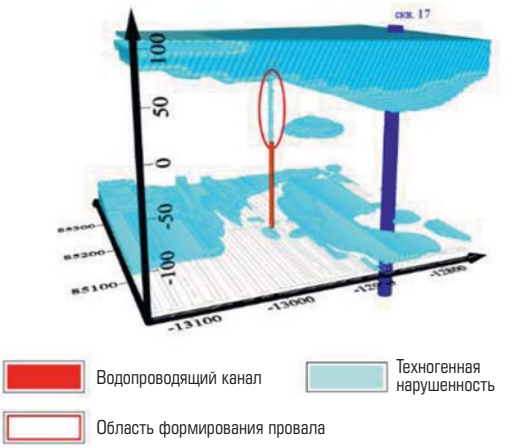

Рис. 2. Характер разрушения надсоляной толщи при радиусе водопроводящего канала 5 м

лялась удельным весом пород *i*-го элемента геологического разреза. Граничные условия формулировали, исходя из следующих соображений: верхнюю границу (земная поверхность) принимали свободной, выбранные размеры исследуемой области обеспечивали равенство нулю на нижней границе вертикальных, а на боковых границах – горизонтальных перемещений. В качестве критерия пластичности использовали условие Кулона – Мора.

Фактор времени учитывали на основе модификации [13] известного в практике реологического анализа метода переменных модулей упругости [14], преимущество которого заключается в том, что он позволяет раздельно описать временной характер деформирования всех отработанных пластов и легко учесть разницу в сроках их отработки.

Формирование водопроводящего канала

Для всех расчетных вариантов анализировали напряженно-деформированное состояние породного массива. При этом появление сквозной области техногенной нарушенности от земной поверхности до канала интерпретировали как возможность перехода статических деформаций подработанного массива в динамическую форму с образованием провала.

Была изучена динамика разрушения надсоляной толщи в процессе увеличения размеров водопроводящего канала в ВЗТ. Согласно расчетам, уже при 5-метровом радиусе канала и снижении в 6 раз механических свойств пород в надсоляной толще непосредственно над ним формируется сквозная область техногенной нарушенности, простирающаяся от канала до земной поверхности (**рис. 2**). В рамках принятой модели это означает, что появляются предпосылки к образованию провала. Используя полученные данные, можно определить скорость наращивания водопроводящего канала вследствие растворения соляных пород.

Определение фактических скоростей растворения является важной задачей при создании адекватных геомеханических моделей при аварийном водопритоке в выработанное пространство рудника. Наиболее простой подход к их оценке состоит в использовании кинетических моделей растворения солей в условиях естественной конвекции при параметрах, отвечающих циркуляции растворов во всем объеме выработанного пространства.

Константу растворения, в частности наиболее склонного к выщелачиванию карналлита *K* (для вертикально ориентированной поверхности), можно оценить с учетом следующей эмпирической зависимости:

$$\mathrm{Sh} = 0{,}745\left(\frac{\rho_{sat}-\rho}{\rho}\cdot\frac{gd^3}{\upsilon D}\right)^{1/4};\quad K = \mathrm{Sh}\frac{D}{d},$$

где Sh – число Шервуда; *d* – толщина слоя воды в выработке, м, ρ_{sat} – плотность насыщенного рассола, кг/м^3; ρ – плотность заполняющего выработки рассола, кг/м^3, *D* – коэффициент диффузии, м^2/сут, *g* – ускорение свободного падения м/с^2, υ – вязкость раствора, Па·с.

Полученные расчетные скорости растворения карналлита характеризуются высокими значениями; коэффициент массоотдачи в среднем имеет порядок 20 см/сут.

Эксперименты по выщелачиванию карналлита растворами, насыщенными по сильвину и галиту, в реальных подземных условиях показывают, что скорости растворения быстро снижаются за счет образования на поверхности карналлита вторичных минералов. Рассчитанная скорость растворения в этом случае более чем на порядок ниже теоретических значений и составляет 0,92 см/сут.

При отсутствии адекватных оценок скоростей растворения соляных пород становится невозможным точное прогнозирование развития процесса деформирования и разрушения подработанного массива при затоплении рудников. Аварийный водоприток в рудник БКПРУ-1 был зафиксирован 17 октября 2006 г. в районе геологоразведочной скважины № 17. Ориентировочный дебит рассолов составил 300–400 м^3/ч, 28 октября было отмечено увеличение водопритока до 1200 м^3/ч. В связи с таким

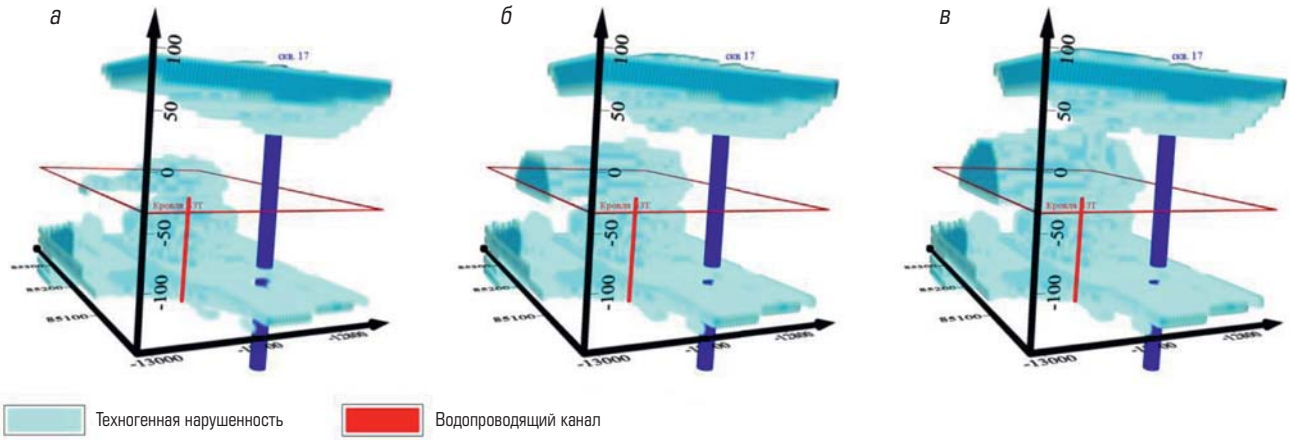

Рис. 3. Результаты математического моделирования процесса образования провала:
а – октябрь 2006 г.; *б* – март 2007 г.; *в* – июль 2007 г.

высоким дебитом откачка рассолов была прекращена, горные работы остановлены, и процесс затопления рудника стал неуправляемым. 28 июля 2007 г. в районе предполагаемого места прорыва вод в горные выработки сформировался провал на земной поверхности.

Таким образом, с начала поступления надсолевых вод в выработанное пространство рудника до образования провала на земной поверхности прошло менее 10 мес. Очень близкое к этому время (около 9 мес) от начала водопритоков до образования провала прошло и при аварии на руднике БКПРУ-3 в 1986 г.

Так как известно время от начала поступления надсолевых вод в выработанное пространство рудника до образования провала на земной поверхности (порядка 280 сут), а по результатам математического моделирования минимальный радиус канала при обрушении составляет 5 м, можно оценить скорость его увеличения в 2 см/сут. Поскольку в процессе затопления рудника аварийный водоприток не был постоянным, а канал не был заполнен рассолами полностью, то полученная скорость является средней за весь расчетный период. Полученная скорость увеличения размеров канала находится в диапазоне теоретических (порядка 20 см/сут, [15]) и экспериментальных (сантиметры в сутки, [16]) оценок скорости растворения соляных пород.

Диапазонная оценка условий образования провала

С учетом полученных оценок скорости увеличения размеров водопроводящего канала было выполнено ретроспективное математическое моделирование аварийного затопления рудника БКПРУ-1 последовательно на моменты времени от начала поступления надсолевых вод в выработанное пространство (17 октября 2006 г.) до образования провала на земной поверхности (28 июля 2007 г.).

Расчеты проводили в два этапа. На первом этапе моделировали НДС подработанного массива на момент времени, предшествующий началу аварийного водопритока. При этом за счет «ослабленных» областей в интервале надсоляной толщи достигалось наилучшее соответствие расчетных и фактических оседаний земной поверхности. На втором этапе в расчетную схему добавляли водопроводящий канал в месте полученного нарушения сплошности ВЗТ и моделировали процесс его увеличения в размерах по латерали вследствие растворения и выноса соляных пород со скоростью 2 см/сут. Размеры «ослабленных» областей и уровень снижения в них механических свойств на этом этапе регулировались фактическими оседаниями земной поверхности.

Согласно полученным результатам, на момент прорыва надсолевых вод (**рис. 3**, *а*) в ВЗТ фиксируется сквозная зона техногенной нарушенности, в пределах которой может образоваться канал проникновения надсолевых вод в выработанное пространство рудника. Пространственно данная зона приурочена к краевой части мульды сдвижения, которая характеризуется значительным градиентом оседаний земной поверхности.

С течением времени (см. рис. 3, *б*) наблюдается развитие области трещиноватости вверх по разрезу надсоляной толщи. К июлю 2007 г. зона техногенной нарушенности простирается уже от выработанного пространства до земной поверхности (см. рис. 3, *в*), что можно трактовать как потенциальную возможность образования провала. Снижение прочностных и деформационных свойств в надсоляной толще в «ослабленной» области составило 2,6 раза. При этом снижение свойств непосредственно в районе максимальных оседаний по результатам математического моделирования достигает 6 раз. По-видимому, данный уровень «ослабления» может служить количественным критерием перехода статических деформаций в динамическую форму, с последующим образованием провала при наличии достаточной по объему полости растворения в ВЗТ.

Глубина провала при этом будет определяться объемом пустот, образовавшихся вследствие процесса растворения, и степенью разрыхления обрушенных пород [13]. В силу объективной сложности точной количественной оценки данных параметров в условиях аварийного затопления рудника прогнозирование глубины провала, безусловно, является приближенным.

Оценка коэффициента заполнения пустот k_z в результате обрушения вышележащих пород может быть выполнена по формуле

Рис. 4. Провал на участке прорыва надсолевых вод (28.07.2007)

$$k_z = \frac{k_p k_s V_p}{V_0 + V_p},$$

где k_p – коэффициент разрыхления разрушенных пород; k_s – коэффициент растворения; V_p – суммарный объем разрушенных пород, м^3; V_0 – объем полости, м^3.

Можно отметить, что в случае $k_z \geq 1$ происходит полное заполнение полости обрушенными породами, и переход статических деформаций соляного массива в динамическую форму с образованием провала становится невозможным.

Первоначальные размеры провала на участке прорыва пресных вод в выработанное пространство рудника БКПРУ-1 составляли (**рис. 4**): воронка – 55×80 м, центральная часть – 5–10 м, глубина – около 15 м.

Считая, что в момент формирования провала весь объем водопроводящего канала оказывается заполненным разрыхленными вышележащими породами без учета их растворения, получим: $V_0 = 7850$ м^3, $V_p = 24900$ м^3. Объем обрушенных пород с учетом их разрыхления с коэффициентом $k_p = 1{,}1 \div 1{,}2$ составляет 27400–29900 м^3. Этого объема оказывается достаточным, чтобы полностью заполнить свободное пространство канала и при этом образовать на земной поверхности провал глубиной 16–30 м.

Можно отметить, что результаты математического моделирования в целом согласуются и с местом (в районе наибольшего градиента оседаний), и с размерами (5–10 м в плане при глубине до 30 м) произошедшего на руднике БКПРУ-1 провала.

Таким образом, согласно расчетам, можно прогнозировать образование провала при достижении каналом радиуса 5–10 м со средней скоростью его увеличения в 2 см/сут. На основании данных допущений, согласующихся с наблюдениями за размером в первый момент после образования провала и экспериментальными величинами скорости растворения соляных пород, можно оценить время образования провала после прорыва надсолевых вод в 250–500 сут.

Полученная оценка, безусловно, носит приближенный характер и требует уточнения для конкретных горнотехнических, горно-геологических и гидрогеологических условий подземной разработки, отражающих особенности строения породного массива, свойства горных пород и ряд других факторов.

Заключение

В соответствии с выполненными исследованиями в качестве количественных критериев, определяющих формирование провала в месте прорыва пресных вод в рудник, предложены степень снижения (в 6 раз и более) механических свойств пород надсоляной толщи вследствие ее деформирования и характерные размеры (5–10 м) водопроводящего канала в соляной толще, образованного в результате растворения соляных пород. В этом случае с учетом полученной скорости увеличения водопроводящего канала (2 см/сут) время зарождения провала оценивается в диапазоне 250–500 сут.

Библиографический список

См. англ. блок. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 17–21
DOI: 10.17580/gzh.2018.06.03

Geomechanical estimation of conditions for sinkhole formation on earth surface at the site of fresh water breakthrough into salt mine

Information about authors
A. A. Baryakh[1], Director, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences
S. Yu. Devyatkov[2], Leading Engineer, sd@mi-perm.ru

[1] Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
[2] Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract
Salt deposit development is always associated with the risk of waterproof stratum failure resulting in hazardous fresh water inflow in mine openings. One of the main consequences of mine flooding due to high solubility of salts is the intensification of mined rock mass deformation that is frequently accompanied by sinkhole formation at the site of water breakthrough. The sinkhole formation as a phenomenon can be described as a transition of static deformation that manifests in earth surface subsidence into dynamic phase in form of failure. The sinkholes sizes could reach hundreds of meters and their formation presents real danger for life activity, leads to considerable financial losses and negative social-economic and ecological aftermaths.
With the use of methods of mathematical modeling based on retrospective estimations of processes that accompanied First Berezniki Potash (BKPRU-1) mine flooding the conditions for sinkhole formation on earth surface were defined in the paper. Failure dynamics in the strata overlying salt rocks in the course of growth of a water conducting channel in the waterproof layers was studied. In all model variants, stress state of rock mass was analyzed. Failure dynamics in the strata overlying salt rocks in the course of growth of a water conducting channel in the waterproof layers was studied. In all model variants, stress state of rock mass was analyzed. Formation of the through damage zone between the ground surface and the channel was interpreted as potential transition of static deformation of the undermined rock mass into dynamic process with sinkhole generation. It is found that conditions for sinkhole at the site of fresh water breakthrough into mine are: formation of water conducting channel with a radius of 5–10 m in salt strata, deformation and the resultant decrease in strength and deformation properties in the overlying strata by factor 6 or more. In this case, the time of sinkhole formation is estimates in the range of 250–500 days.

Keywords: mine flooding, sinkholes, salt dissolution, stress state, mathematical modeling, failure.

References

1. Mustel I. P., Shlendova T. K. Changing of hydrogeological conditions under emergency deformation of the undermined rock mass (with an example of Berezniki-1 mine). *Gornyi Zhurnal.* 2016. No. 4. pp. 32–39. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.06
2. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical estimation of deformation intensity above the flooded potash mine. *Journal of Mining Sciences.* 2017. Vol. 53, No. 4. pp. 630–642.
3. Ponomarenko T. Ecological, economic and social consequences of emergencies on potash mines. *Management Systems in Production Engineering.* 2012. No. 2(6). pp. 28–31.
4. Owoseni J. O., Tamarautobou E. U., Asiwaju-Bello Y. A. Application of Sequential Analysis and Geographic Information Systems for Hydrochemical Evolution Survey, Shagari Environ, Southwestern Nigeria. *American International Journal of Contemporary Research.* 2013. Vol. 3, No. 3. pp. 38–48.
5. Courtney M. G. R. Determining the number of factors to retain in EFA: Using the SPSS R-Menu v2.0 to make more judicious estimations. *Practical Assessment, Research and Evaluation.* 2013. Vol. 18(8).
6. Hisafumi Asaue, Naoyuki Tadakumsa, Katsuaki Koike. Application of GIS to Hydrogeological Structure Modeling Aimed at Conservation of Groundwater Resources. *Geoinformatics.* 2014. Vol. 25, Iss. 3. pp. 159–168.
7. Belkhiri L., Narany T. S. Using multivariate statistical analysis, geostatistical techniques and structural equation modeling to identify spatial variability of groundwater quality. *Water Resources Management.* 2015. Vol. 29, Iss. 6. pp. 2073–2089.
8. Kologrivko A. A. Decrease in geoecological consequences by underground mining of potash fields. *Herald of Polotsk State University. Series F: Civil Engineering. Applied.* 2014. No. 16. pp. 101–110.
9. Zubov V. P., Smychnik A. D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute.* 2015. Vol. 215. pp. 29–37.
10. Samodelkina N. A. Prediction of negative consequences of Berezniki Mine-1 flooding. *Strategies and Processes of Georesources Development : Collection of Scientific Papers.* Perm : GI UrO RAN. 2014. Iss. 12. pp. 84–87.
11. Devyatkov S. Yu. Determining conditions of sinkholes on ground surface. *Strategies and Processes of Georesources Development : Collection of Scientific Papers.* Perm : GI UrO RAN. 2014. Iss. 12. pp. 96–98.
12. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Samodelkina N. A. Theoretical explanation of conditions for sinkholes after emergency flooding of potash mines. *Journal of Mining Science.* 2016. Vol. 52, No. 1. pp. 36–45.
13. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Rheological analysis of geomechanical processes. *Journal of Mining Science.* 2005. Vol. 41, No. 6. pp. 522–530.
14. Amusin B. Z., Linkov A. M. Applying variable modules in solving a class of problems of linearly hereditary creep. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela.* 1974. No. 6. pp. 162–166.
15. Konosavsky P. K., Potapov A. A., Makashov S. E. Predictive estimate of carnallite dissolution in pillars in Berezniki Mine-1 after emergency flooding (Upper Kama Potash Deposit). Modeling in solution of geoecological problems: Sergeev's Lectures. Moscow : GEOS. 2009, Iss. 11. pp. 357–361.
16. Khodkov A. E. Test data on in situ leaching of carnallite. *Transactions of the All-Union Research Institute of Mineral-Salt Production.* 1953. Iss. 28. pp. 38–49.

УДК 627:622.363

ОСОБЕННОСТИ ОТВЕДЕНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ ПРЕДПРИЯТИЙ КАЛИЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

А. П. ЛЕПИХИН, *заведующий лабораторией, проф., д-р геогр. наук, lepihin49@mail.ru*
А. В. БОГОМОЛОВ, *научный сотрудник, канд. техн. наук*

Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Обоснованы условия регулируемого сброса промышленных солевых стоков в Камское водохранилище.

Ключевые слова: *Верхнекамское месторождение, калийные соли, избыточные рассолы, гидродинамическое моделирование, отведение сточных вод, обогащение калийной руды, р. Кама (Камское водохранилище).*

DOI: *10.17580/gzh.2018.06.04*

Введение

В Пермском крае разрабатывается одно из крупнейших в мире Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКМС). Основные производственные комплексы по освоению данного объекта расположены в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла. До последнего времени разработкой месторождения занималось только ПАО «Уралкалий», однако в настоящее время к этому процессу активно подключаются другие компании. ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» планирует в ближайшие годы запустить крупный Усольский рудник, строит производственные объекты ПАО «Акрон». В результате суммарное производство готовой солесодержащей продукции может превысить 20 млн т/год.

Такие большие объемы производства неизбежно усилят воздействие на окружающую природную среду, на ее отдельные компоненты. Наибольшей нагрузке подвержены поверхностные водные объекты, что определяется спецификой принятых производственных процессов как добычи руды, так и извлечения из нее полезных компонентов. В настоящее время удельный объем образования избыточных рассолов на предприятиях ВКМКМС составляет 1 м^3 рассолов на 1 т готовой продукции. Соответственно, при современном объеме производства в 10 млн т/год объем избыточных рассолов достигает 10 млн м^3/год. Наличие такого большого количества загрязненных сточных вод формирует одну из главных экологических проблем Пермского края.

© Лепихин А. П., Богомолов А. В., 2018