11. Rauche H. Sinkhole Formation over Flodded Potash Mines – Case Studies from the Motherland of the Potash Industry. *Fall 2000 Meeting*. San Antonio, 2000. p. 161.
12. Borzakovskiy B. A., Aptukov V. N., Tenison L. O. On possibility of new sink holes in the flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2015. No. 10. pp. 5–13.
13. Regulations for protection of mines from floodingand protection of undermined objects from flooding and protection in Verkhnekamskoe potassium salt deposit (technological regulations). Saint Petersburg : VNIIG, 2008. 95 p.
14. Bérest P., Karimi-Jafari M., Brouard B. Geometrical versus rheological transient creep closure in a salt cavern. *Comptes Rendus Mécanique*. 2017. Vol. 345, Iss. 11. pp. 735–741.
15. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A.A. Seismic–Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 6. pp. 981–992.
16. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
17. Warren J. K. Evaporites: A Geological Compendium. 2nd ed. Cham : Springer, 2016. 1812 p.
18. Minkley W., Menzel W., Konietzky H., Te Kamp L. A visco-elasto-plastic softening model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics : Proceedings of the International FLAC Symposium*. London : CRC Press, 2020. pp. 21–27.
19. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Water-Tight Stratum Rupture under Large-Scale Mining. Part II. *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48, Iss. 6. C. 954–961.
20. Vasilchuk M. P., Iofis M. A. Analysis of geomechanical processes and causes of accidents in the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit. *Marksheyderskiy vestnik*. 2007. No. 1(59). pp. 30–32.
21. Pachgin V. V. The lowering of likelihood of groundwater irruption into the mine at intensive mining of potash seams. *GIAB*. 2017. Special issue 5-2. Industrial safety of enterprises of mineralresource complex in the XXI century-2. pp. 126–133.

УДК 553.632:004.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

А. С. СЕННОВ,
старший научный сотрудник,
канд. геол.-минерал. наук,
Andrey.Sennov@uralkali.com

А. В. МУХАМЕТДИНОВ,
старший научный сотрудник

А. И. МЯСИЧЕНКО,
младший научный сотрудник

А. В. КАЛУГИН,
младший научный сотрудник

Филиал АО «ВНИИ Галургии» в Санкт-Петербурге, Россия

Обоснованы особенности применения ГИС-технологий и программных продуктов при работе с аппаратом многомерной математической статистики. Описаны методы численного моделирования для решения практических задач, возникающих при отработке месторождений природных солей.

Ключевые слова: *прикладное математическое моделирование, программное обеспечение, цифровая модель местности, геоматика, геоинформационные технологии, гидрогеодинамическое и гидрогеохимическое моделирование.*

DOI: *10.17580/gzh.2021.04.09*

Введение

Для любого горного производства важнейшими задачами являются обеспечение безопасности отработки месторождения и охрана среды обитания в процессе производства. Для месторождений солей особую важность в связи с этим приобретает изучение природных вод как поверхностных, так и подземных, потому что на самом деле те и другие тесно связаны.

Современные научные исследования невозможны без активного применения компьютерных технологий. Их используют для хранения и анализа данных, выполнения всевозможных расчетов, построения чертежей и карт и т. д. [1].

В науках о Земле широко используют геоинформатику, в рамках которой сформировано направление по цифровому анализу рельефа (ЦАР) с целью получения практически значимой информации (Digital Terrain Analysis) [2, 3]. Основой всех исследований в этой области является цифровая модель рельефа (ЦМР, Digital Elevation Model, DEM). С ее помощью возможно как создание различных тематических карт, так и выполнение моделирования, например поверхностного стока, степени увлажнения почв и т. п.

Исследования также невозможны без применения аппарата многомерной математической статистики. Природно-техногенные объекты отличаются высокой сложностью и характеризуются большим числом действующих параметров, поэтому исследование связей, взаимодействий и причин различных явлений без этого весьма затруднительно [4].

Наконец, многие практические задачи эффективно решают с помощью математического моделирования. Опять же в силу сложности и многомерности природно-техногенных объектов эти задачи не могут быть решены с использованием простых аналитических методов и требуют привлечения численного моделирования.

В настоящей статье раскрыты особенности применения информационных технологий для решения практических задач, возникающих при отработке месторождения природных солей. Поскольку в рамках одной статьи невозможно сделать обзор всего разнообразия существующего программного обеспечения, ниже приводятся только те его элементы, которые были использованы авторами.

Объект исследования

Территория расположения Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) представляет собой низкогорный, достаточно расчлененный рельеф с развитой речной сетью, к западу переходящий в долину р. Камы. Абсолютные отметки земной поверхности изменяются от приблизительно 250 м на востоке области до 100 м с небольшим – на западе.

Продуктивная толща залегает на глубине нескольких сотен метров и перекрывается раннепермскими терригенными карбонатными породами, в которых идут процессы выщелачивания. В надсолевой толще принято выделять несколько водоносных горизонтов, но они слабо изолированы и представляют собой единую гидравлическую систему. Вследствие процессов выщелачивания и техногенных изменений в массиве при отработке в породах формируются зоны повышенной трещиноватости с пониженной прочностью и высокой водно-фильтрационной способностью. По некоторым данным, водопроводимость на отдельных участках достигает 10000 м^2/сут и более.

Программное обеспечение и некоторые исходные данные

В качестве основной ГИС-программы была выбрана QGIS 2.18 (Quantum GIS) [5], свободная кроссплатформенная геоинформационная система, выпускаемая под лицензией GNU. Данный выбор, помимо возможностей самой программы, обусловлен ее хорошим взаимодействием с программным продуктом для геоинформационного анализа SAGA 6.1.0 (System for Automated Geoscientific Analyses), также выпускаемым под лицензией GNU [6]. От популярной ArcGIS она отличается значительно большим набором инструментов анализа и явно недостаточной документацией. Последнее отчасти компенсируется большим числом англоязычных статей.

Самые популярные ГИС-программы включают технологии построения ЦМР. Кроме того, на основе данных дистанционного зондирования созданы глобальные ЦМР, из которых не меньше десятка находятся в свободном доступе. Не останавливаясь на их обзоре, отметим, что авторами были выбраны данные SRTM3 (The Shuttle Radar Topography Mission v3) Международного проекта по созданию цифровой модели высот. В данном проекте принимали участие НАСА, Министерство обороны США, Германский аэрокосмический центр DLR и Итальянское космическое агентство ASI [7]. В свободном доступе имеются данные радарной съемки с разрешением 3 с в одном пикселе, что приблизительно соответствует 90 м.

В качестве программы для многомерного статистического анализа использовали TIBC Statistica 13.

Для математического моделирования физических процессов были реализованы различные вычислительные модули, разработанные Геологической службой США [8]. Так, для моделирования движения подземных вод использовали программы ModFlow 2005 и ModflowNWT, для моделирования речного стока – программу STREAM, а также другие совместимые с ModFlow инструменты. Для подготовки исходных данных и анализа результатов использовали пакеты Processing Modflow X и Groundwater Modeling System 10.4. Основным программным комплексом, реализуемым для создания гидродинамических моделей, на сегодняшний день является GMS (Groundwater modeling system) 10.4.

Особенность данной программы – хорошая совместимость с основными выходными форматами ГИС-программ, а также наличие мощных инструментов для визуализации и анимации результатов моделирования.

Для гидрохимического моделирования использовали программу PHREEQC [9].

Применяли данные государственных метеорологических и гидрогеологических служб, отчеты о геологических изысканиях, а также результаты собственных исследований.

ГИС-анализ и моделирование речной сети

Исследования выполняются в следующей последовательности:

- построение цифровой модели рельефа;
- фильтрация модели с целью устранения шума;
- гидрокоррекция;
- оконтуривание общей площади водосбора;
- определение положения речной сети.

При необходимости выполняют расчеты дополнительных морфометрических показателей, например определяют уклоны склонов, их экспозию, топографический индекс влажности и т. п.

Все необходимые модули имеются в ГИС SAGA, как правило, присутствуют также варианты от разных авторов.

Фильтрацию выполняют по алгоритму Mesh Denoice [10], выбранному из почти двух десятков возможных и показавшему, по мнению авторов, наилучшие результаты.

В большинстве ЦМР присутствуют впадины без стока. Это могут быть как естественные понижения, так и ложные, вызванные ошибками данных или их интерполяции. Над устранением этих впадин работали разные авторы, в использованной версии SAGA присутствуют четыре алгоритма, был выбран [11]. Он основан на поиске направления потоков по минимальной высоте заполнения, в процессе работы может быть выделен и контур водораздела.

Для моделирования поверхностного стока разработаны разные алгоритмы, соответственно в SAGA присутствуют различные модули для решения такой задачи. Авторами был использован модуль Flow Accumulation (Top-Down), основанный на многомерной модели максимального градиента уклона [12].

По площади водосбора выполнено моделирование речной сети с использованием модуля Channel Network and Drainage Basins. Автором этого и нескольких похожих модулей является O. Conrad (Institute of Geography, University of Hamburg), но публикаций именно по этому методу у него нет. Все модули указанного автора, моделирующие речную сеть, определяют местоположения истоков отдельных речек (Heads) и точки их впадения в более крупные реки (Mouth). С помощью указанного модуля рассчитывают также границы речных бассейнов низших порядков. Таким образом получают необходимые исходные данные для расчетов в ModFlow-совместимой программе Stream; все речки выделены в отдельные сегменты.

Пример цифровой модели рельефа с картой речной сети, подготовленной для моделирования речного стока, приведен на **рис. 1**.

Следует отметить, что похожие технологии присутствуют в гидрологическом модуле ArcGIS, но перечень возможностей там значительно меньше, чем в SAGA [13].

Далее необходимо определиться с гидрогеологической схематизацией в разрезе. Задача осложняется тем, что вся толща надсолевых пород является гидравлически связанной, хотя выделение отдельных водоносных горизонтов, безусловно, имеет практический смысл и необходимо для создания гидрогеодинамической модели месторождения.

Решить данную задачу можно с помощью методов многомерной статистики. В частности, в качестве метода классификации использовали стандартную процедуру факторного анализа методом главных компонент. В качестве исследуемых параметров приняты геометрия пластов, отметки уровней воды в водоносных горизонтах и земная поверхность. Приведем типичный график собственных значений для одного из исследованных объектов (см. **таблицу**). Расчет выполняли без ограничения числа факторов. В данном примере статистически достоверно выделение трех водоносных горизонтов, хотя третий объект – на грани ошибки. Большинство расчетов указывают на достоверность выделения только двух водоносных горизонтов.

Как обычно, окончательное решение принимают в процессе интерпретации компонент. Одним из основных методов интерпретации является анализ уровенных поверхностей, построенных по данным выделенных методом главных компонент массивов. Например, водоносный горизонт, который интерпретируют как верхний, имеет очень высокую корреляцию уровня воды с земной поверхностью и кровлей верхних водоносных пластов. Это хорошо объясняется физическими причинами. Наоборот, нижний горизонт по этим параметрам не коррелирует.

В дальнейшем при работе над геофильтрационной моделью уровенные поверхности, полученные по разным данным, сравнивали между собой и с данными, полученными из статистических выборок. Методика и детали применения данного метода подробно описаны авторами в статье [14].

В результате выполнения работ по сбору информации, ее статистической обработке и анализу разного рода доступных материалов (метеорологических, гидрологических, гидрогеологических и др.) становится возможным проведение гидродинамического моделирования [15, 16].

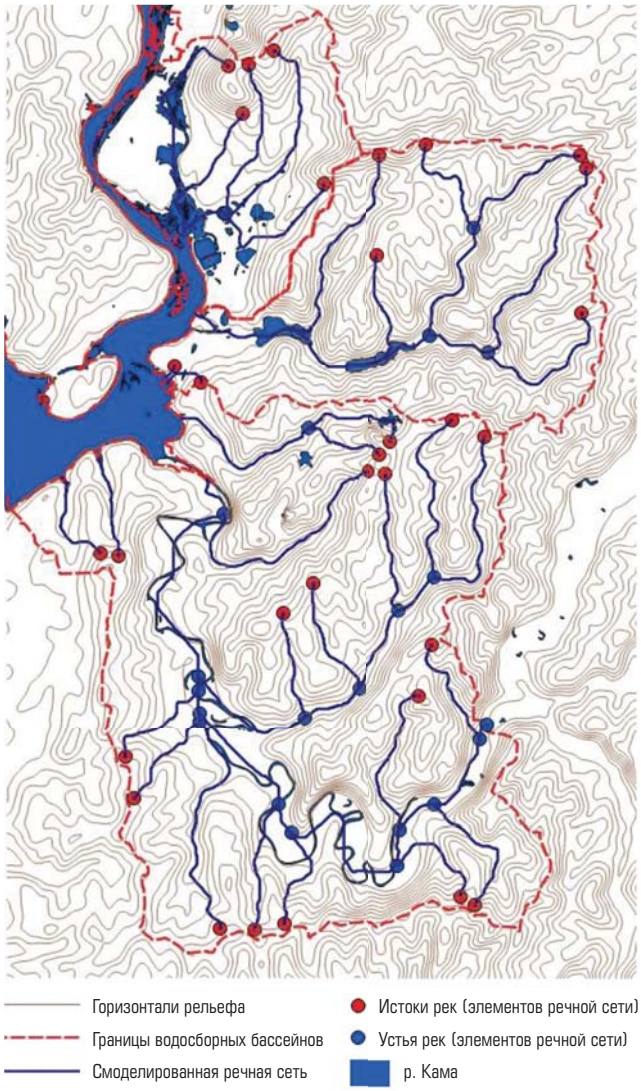

Рис. 1. Модель речной сети, подготовленная по данным дистанционного зондирования

Доля объясненной дисперсии

Компонента	Начальные собственные значения		
	Итого	Процент дисперсии	Кумулятивный процент
1	2,951	42,151	42,151
2	2,029	28,986	71,137
3	0,835	11,927	83,064
4	0,441	6,300	89,364
5	0,372	5,314	94,678
6	0,246	3,508	98,186
7	0,127	1,814	100,000

Чаще всего в лаборатории выполняют работы по созданию региональных гидродинамических моделей. Среди основных особенностей процесса следует отметить следующие.

1. Отражение достоверного геологического строения участка. Все кровли и подошвы слоев задают из геологической модели

и в дальнейшем изменяют в зависимости от особенностей режима питания, транзита и разгрузки водоносных горизонтов на разных участках.

2. Использование бассейнового принципа построения моделей, т. е. полное соответствие математических границ модели физическим гидродинамическим границам в природно-техногенных системах.

3. Калибровка (верификация) модели в нестационарном режиме с использованием данных режимных наблюдений в скважинах, сведений об изменении величины инфильтрационного питания в зависимости от сезона года, а также данных о колебании уровня воды в Камском водохранилище.

4. Учет в модели влияния всех техногенных воздействий, таких как тампонаж или откачка из контура водопонижающих скважин.

На выходе получают базовую гидродинамическую модель, которая служит хорошей основой и значительно упрощает и ускоряет создание локальных гидродинамических моделей для решения конкретных задач.

Непосредственно для вычислении используют модули Modflow NTW и реже Modflow 2005, что обусловлено особенностью гидрогеологических условий месторождения (мощная зона аэрации, значительные сезонные колебания уровня подземных вод в первом от поверхности водоносном горизонте) [17].

Отдельной задачей является анализ состава рассолопроявлений в горных выработках с целью оценки их опасности для отработки месторождения. Чистые по генезису рассолы – постседиментационные, конденсатные, закладочные или из надсолевых отложений – позволяют сразу сделать необходимые выводы. Но поскольку рассолы часто бывают смешанного состава, не всегда удается сразу получить необходимую информацию. В таком случае могут помочь гидрохимические расчеты и моделирование. С их помощью можно предположить, какие минералы и в каком количестве растворит рассол заданного состава или, наоборот, решить обратную задачу – определить, что и в каком количестве растворялось при формировании рассола конечного состава из известного начального.

В одном из рудников было вскрыто рассолопроявление значительного объема. Возник вопрос о генезисе этого рассолопроявления. Исследовательская группа, ссылаясь на состав рассолов, значительно отличавшийся как от надсолевых вод, так и от постседиментационных рассолов, выдвинула предположение, что это рассолы подсолевого происхождения [18].

Составы всех трех типов рассолов, по данным исследовательской группы, показаны на **рис. 2**.

Поскольку присутствие остальных компонентов мало́, в первом приближении можно рассматривать проблему с использованием диаграммы NaCl – KCl – $MgCl_2$. На рисунке видно, что седиментационные рассолы имеют существенное содержание магния, надсолевые – преимущественно хлоридно-натриевого состава, а рассолопроявление сдвинуто от вершины NaCl в сторону KCl. Индекс натрия 73,3 %, магния – около 2 %.

Задачу можно попробовать решить методами вычислительной гидрогеохимии. Надсолевой рассол был «добавлен» в избыток

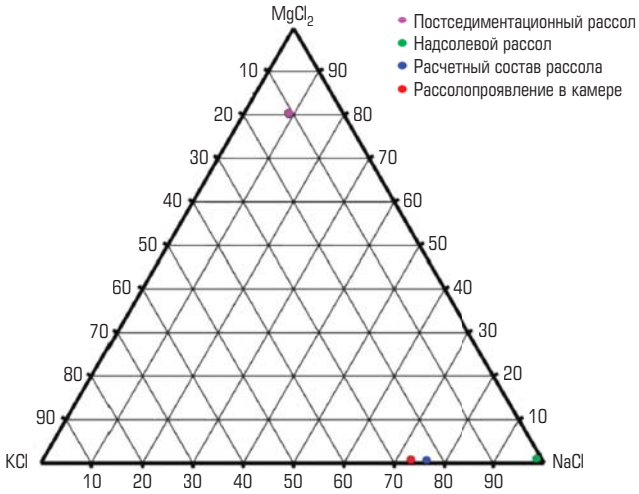

Рис. 2. Фигуративные точки состава рассолов

сильвина и галита, что примерно соответствует реальной ситуации, так как выше рассолопроявления залегает сильвинит. Расчет вели с помощью программы PHREEQC по методу Питцера [19, 20]. В состоянии насыщения исходный рассол получил индекс по натрию 78 % (исходный 98,2 %). Если исходный рассол был бы чуть более пресным, то индекс натрия опустился бы до тех же 70 %. Состав рассола зависит также от соотношения сильвина и галита в породе, через которую он фильтруется. Очевидно, что в избытке сильвина галит частично высаливается.

Таким образом, моделирование показало, что данный рассол вполне мог сформироваться при фильтрации вод надсолевого комплекса через сильвинитовые отложения.

В лаборатории также выполняют работы по гидрогеомиграционному моделированию для решения прикладных задач производства.

Авторы в своих исследованиях использовали гидродинамический подход к решению подобных задач, т. е. анализировали не конкретное вещество, а некую абстрактную субстанцию, переносимую потоком движущейся жидкости. Как правило, используют модель с гидродинамической дисперсией, метод характеристик, позволяющий избежать численной дисперсии [21] и изотермы в виде элементарных функций, описывающие равновесие системы вода–порода.

В случае необходимости смоделировать движение жидкостей разной плотности используют метод конечных разностей (МКР), что вызывает дополнительные трудности в результате заметного возрастания численной дисперсии. Для моделирования движения жидкостей разных плотностей реализуют программный модуль SEAWAT V 4.

Таким образом, данную задачу решаем в два этапа. На первом проводим гидродинамическое моделирование (в соответствии с тем, как было описано чуть ранее для создания региональных моделей), на втором – на ее основе создаем модель массопереноса.

Следует заметить, что наработки в области гидрогеодинамического моделирования и моделирования реальных

физико-химических взаимодействий в перспективе должны быть объединены в одну модель. Необходимо рассматривать единый поток движущейся воды – как поверхностной, так и подземной. Следует также выполнять расчеты физико-химических взаимодействий.

Заключение

Показано, что возрастающая сложность природно-техногенных объектов исследования требует привлечения разнообразных программных инструментов. Так, при гидрогеологическом изучении Верхнекамского месторождения калийных солей необходимо было построение речных бассейнов и речной сети, для этого использовали геоинформационные технологии. Далее требовалась гидрогеодинамическая схематизация в пределах этих бассейнов, в этом случае помогло применение методов многомерной статистики. Для моделирования гидродинамических процессов в пределах горизонтов применяли различные вариации известной программы ModFlow, в качестве основного инструмента гидрогеохимического моделирования выступала программа PHREEQC.

Таким образом, в качестве инструментов исследования применяли информационные технологии в виде различных программ, реализующих самые разнообразные методы и алгоритмы. Использование какого-то конкретного программного продукта не дает требуемых результатов, необходимо именно совместное, комплексное использование методически взаимосвязанных методов исследования на основе информационных технологий. Только подобным образом возможно эффективное изучение сложных природно-техногенных объектов, с которыми специалисты сталкиваются, в частности, на Верхнекамском месторождении калийных солей.

Библиографический список

1. *Сеннов А. С., Мухаметдинов А. В.* Особенности использования информационных технологий при исследовании подземных вод Верхнекамского месторождения калийных солей // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2019. С. 103–106.
2. *Wilson J. P., Gallant J. C.* Terrain Analysis: Principles and Applications. – New York : John Wiley & Sons, 2000. – 520 p.
3. *Глотов А. А.* Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием // Геоматика. 2013. № 4. С. 32–36.
4. *Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A.* Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
5. Документация QGIS 2.18. URL: https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/# (дата обращения: 12.03.2021).
6. Software. URL: http://www.saga-gis.org/en/index.html (дата обращения: 12.03.2021).
7. 5 Free Global DEM Data Sources – Digital Elevation Models. 2021. URL: https://gisgeography.com/free-global-dem-data-sources/ (дата обращения: 12.03.2021).
8. Water Resources Groundwater Software / U.S. Geological Survey. URL: water.usgs.gov/software/lists/groundwater (дата обращения: 12.03.2021).
9. PHREEQC Version 3 / U.S. Geological Survey, 2020. URL: https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3 (дата обращения: 12.03.2021).
10. *Xianfang Sun, Rosin P. L., Martin R. R., Langbein F. C.* Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2007. Vol. 13. No. 5. P. 925–938.
11. *Wang L., Liu H.* An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20. Iss. 2. P. 193–213.
12. *Cheng-Zhi Qin, A-Xing Zhu, Tao Pei, Bao-Lin Li, Scholten T.* et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient // Precision Agriculture. 2011. Vol. 12. Iss. 1. P. 32–43.
13. *Карфидова Е. А., Макеев В. М., Кравченко И. М.* Моделирование сети поверхностного стока для обеспечения горно-геологической безопасности Верхнекамского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 8. С. 91–101.
14. *Сеннов А. С.* О возможном подходе к гидрогеодинамической схематизации надсолевой толщи Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2016. № 4. С. 48–51. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.09
15. *Rowiński P. M.* Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. – Warszawa, 2008. E-10 (406). Hydraulic Methods for Catastrophes: Floods, Droughts, Environmental Disasters. – 207 p.
16. *Alvarez P. J. J., Illman W. A.* Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 612 p.
17. MODFLOW-NWT: A Newton Formulation for MODFLOW-2005 / USGS, 2020. URL: https://www.usgs.gov/software/modflow-nwt-a-newton-formulation-modflow-2005 (дата обращения: 12.03.2021).
18. *Чайковский И. И., Коротченкова О. В., Трапезников Д. Е.* Новый генетический тип зон выщелачивания в солях Верхнекамского месторождения калийных солей: гидрохимические, минералогические // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4. С. 337–350.
19. *Pitzer K. S.* Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations // Journal of Physical Chemistry. 1973. Vol. 77. Iss. 2. P. 268–277.
20. *Steding S., Zirkler A., Kühn M.* Geochemical reaction models quantify the composition of transition zones between brine occurrence and unaffected salt rock // Chemical Geology. 2020. Vol. 532. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.119349
21. *Woods J. A., Teubner M. D., Simmons C. T., Narayan K. A.* Numerical error in groundwater flow and solute transport simulation // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. No. 6. 1158. DOI: 10.1029/2001WR000586 ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 63–68
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.09

Application of information technologies in the analyses of groundwater in the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposits

Information about authors
A. S. Sennov [1], Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Andrey.Sennov@uralkali.com
A. V. Mukhametdinov [1], Senior Researcher
A. I. Myasichenko [1], Junior Researcher
A. V. Kalugin [1], Junior Researcher

[1] Branch of "VNII Galurgii" JSC in Saint Petersburg

Abstract
The article gives a review of the software techniques used in solution of actual applied problems in the mining industry. The adequate decision-making requires various software techniques. The list of the applied problems includes processing of remote sensing data, digital elevation modeling and generation of other digital models of terrain, localization of catchment basins and river networks, or morphometric analysis. Various geoinformation systems are used to this end.
Another task is hydrogeological patterning of aquifers. It is required to use the methods of multivariate statistics, such as the factor analysis, for instance.
The multidimensionality and complexity of natural and engineering systems also condition the use of the mathematical modeling apparatus based on the numerical solution of second-order elliptical equations in terms of partial derivatives.
Natural water feature diverse physicochemical processes, which should also be calculated.

The modeling outcome is used to predict different processes in the nature-and-mine system. For example, flow of pollutions in underground hydrosphere, lowering of the water level, dissolution–precipitation reactions, etc.

Applied problem solving requires using wide ranges of mathematical methods and relevant software techniques.

Keywords: applied mathematical modeling, software, digital elevation model, geomatics, geoinformation technologies, hydrogeodynamic and hydrogeochemical modeling.

References

1. Sennov A. S., Mukhametdinov A. V. Use of information technologies in ground water analysis in the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Current Tendencies in Theory and Practice of Mineral Mining and Waste Management : International Conference Proceedings*. Yekaterinburg, 2019. pp. 103–106.
2. Wilson J. P., Gallant J. C. Terrain Analysis: Principles and Applications. New York : John Wiley & Sons, 2000. 520 p.
3. Glotov A. A. Application of DEM for tasks of rational nature management and monitoring of natural processes. *Geomatika*. 2013. No. 4. pp. 32–36.
4. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
5. Documentation for QGIS 2.18. Available at: https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/# (accessed: 12.03.2021).
6. Software. Available at: http://www.saga-gis.org/en/index.html (accessed: 12.03.2021).
7. 5 Free Global DEM Data Sources – Digital Elevation Models. 2021. Available at: https://gisgeography.com/free-global-dem-data-sources/ (accessed: 12.03.2021).
8. Water Resources Groundwater Software. U.S. Geological Survey. Available at: water.usgs.gov/software/lists/groundwater (accessed: 12.03.2021).
9. PHREEQC Version 3. U.S. Geological Survey, 2020. Available at: https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3 (accessed: 12.03.2021).
10. Xianfang Sun, Rosin P. L., Martin R. R., Langbein F. C. Fast and Effective Feature-Preserving Mesh Denoising. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2007. Vol. 13, No. 5. pp. 925–938.
11. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20, Iss. 2. pp. 193–213.
12. Cheng-Zhi Qin, A-Xing Zhu, Tao Pei, Bao-Lin Li, Scholten T. et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12, Iss. 1. pp. 32–43.
13. Karfidova E. A., Makeev V. M., Kravchenko I. M. Modeling the surface runoff network to ensure geological safety at the Verkhnekamsk deposit. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2018. No. 8. pp. 91–101.
14. Sennov A. S. A possible approach to the suprasalt formation hydrogeodynamic schematization of Verkhnekamskoe deposit of potassium salts. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 4. pp. 48–51. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.09
15. Rowiński P. M. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Warszawa, 2008. E-10 (406). Hydraulic Methods for Catastrophes: Floods, Droughts, Environmental Disasters. 207 p.
16. Alvarez P. J. J., Illman W. A. Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2006. 612 p.
17. MODFLOW-NWT: A Newton Formulation for MODFLOW-2005. USGS, 2020. Available at: https://www.usgs.gov/software/modflow-nwt-a-newton-formulation-modflow-2005 (accessed: 12.03.2021).
18. Chaikovskiy I. I., Korotchenkova O. V., Trapeznikov D. E. A New Genetic Type of Leaching Zone in Salts of the Verkhnyaya Kama Potassium Salt Deposit: Hydrochemical, Mineralogical, and Structural Indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019. Vol. 54, No. 4. pp. 308–319.
19. Pitzer K. S. Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations. *Journal of Physical Chemistry*. 1973. Vol. 77, Iss. 2. pp. 268–277.
20. Steding S., Zirkler A., Kühn M. Geochemical reaction models quantify the composition of transition zones between brine occurrence and unaffected salt rock. *Chemical Geology*. 2020. Vol. 532. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.119349
21. Woods J. A., Teubner M. D., Simmons C. T., Narayan K. A. Numerical error in groundwater flow and solute transport simulation. *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39, No. 6. 1158. DOI: 10.1029/2001WR000586