

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГГИС “MICROMINE”<sup>1</sup>

© 2021 г. В. А. Лямина<sup>а, \*</sup>, О. В. Шемелина<sup>а, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: balandis@igm.nsc.ru

\*\*e-mail: shem@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

После доработки 13.01.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

Приведен расчет объемов загрязнений подземных вод в зоне техногенного воздействия. Гидрохимическая аномалия возникла в результате проникновения жидких отходов предприятия в окружающую среду. Инфильтраты достигают уровня грунтовых вод и смешиваются с ними, далее распространяясь с потоком грунтовых вод. Аномалия характеризуется довольно высокой общей минерализацией. В зоне смешения техногенных и природных вод происходит разбавление содержания солей. С помощью программных пакетов ArcGIS и “Micromine” построена трехмерная модель техногенной аномалии. База данных для создания модели включает в себя некоторые данные мониторинга скважин, расположенных на площадке размещения отстойников отходов. Для каждой скважины используются многолетние наблюдения за уровнем подземных вод. Также учтены литологические особенности участка. Модель позволяет оценить общий объем загрязнения, изменение объема в течение времени, выделить контуры и наиболее и наименее загрязненные участки.

*Ключевые слова:* ГГИС, ArcGIS, Micromine, подземные воды, гидрохимическая аномалия.

**DOI:** 10.31857/S0321059621040131

### ВВЕДЕНИЕ

Горно-геологическая информационная система (ГГИС) “Micromine” используется в основном для трехмерного моделирования рудных тел месторождений твердых полезных ископаемых и оценки запасов руд, создания геолого-математических моделей месторождений, проектирования карьеров и подземных выработок для эффективной отработки месторождений полезных ископаемых [7, 9–11]. Однако определение пространственных закономерностей распределения тех или иных характеристик имеет значение не только для рудных, но и для многих других объектов. Так, например, при помощи инструментов “Micromine” анализировали пласты угольных месторождений [6]. При отработке гранитных массивов очень важны четкое определение зон выветривания и контактов пород, радиологические показатели и трещиноватость массива; для огнеупорных глин и каолинов – пространственная изменчивость мощности пласта и разделение глин на сорта по химическим показателям опробования для дальнейшей селективной добычи;

для известняков и доломитов – точное определение зон выветривания и карстообразования [1]. Моделирование в ГГИС “Micromine” позволяет прогнозировать зоны возможных тектонических нарушений [9], оценивать нефтегазоперспективность пород [3], запасы торфа и их категоризацию [2]. Также А.А. Басаргин [1] предлагает использовать возможности программы для моделирования гидродинамических систем, а также для расчета массопереноса, загрязненности, химического состава и т.п.

Цель данной работы – демонстрация возможности трехмерного моделирования гидрогеохимической обстановки с использованием программного пакета “Micromine”. Перед авторами стояла задача определить контуры области загрязнения подземных вод, а также оценить объемы вод с разными величинами общей минерализации. Проблема неравномерного расположения наблюдательных скважин на участке и, как следствие, значительных пробелов в опробовании решена с помощью интерполяции данных в программе ArcGIS. Интерполяция данных проводилась методом обратно-взвешенных расстояний (ОВР). Использование геостатистических мето-

<sup>1</sup> Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

дов в данном случае оказалось нецелесообразным из-за небольшого количества данных.

Оценка объемов загрязненных вод выполнена трехмерным моделированием с использованием эмпирических и расчетных данных. Для перехода от двумерного моделирования в ArcGIS к трехмерной модели использован программный пакет "Micromine" – наиболее подходящий (из имеющихся в наличии) прежде всего потому, что рассматриваемый водоносный горизонт представлен породами разного состава и разного геологического возраста и проводить расчет объемов воды, находящейся в поровом пространстве различных пород, проще с использованием детальной трехмерной модели. Создание модели в "Micromine" позволяет одновременно рассчитывать объем пор, заполненных водами различной степени загрязненности, с учетом литологии разного генеза.

Конечно, для гидрогеологического моделирования есть достаточно большое количество специализированного программного обеспечения, ориентированного на решение конкретных задач, например "Mike She" и "Waterloo Hydrogeologic". Однако единичная исследовательская задача, стоявшая перед авторами, не подразумевает приобретения таких программных пакетов для ее решения. Кроме того, большинство программ для гидрогеологического моделирования требуют большого количества входящих данных, таких как проницаемость пород, мощность водоносного горизонта и т.п., которые в исследуемом случае отсутствуют в необходимом количестве.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Загрязненный участок подземных вод находится вблизи предприятия химического производства, его загрязнение произошло при проникновении жидких промышленных отходов во вмещающие грунты и далее в горизонт подземных вод. Хранилища жидких отходов представляют собой наземные емкости общим объемом порядка ста тысяч кубометров. Емкости углублены во вмещающие грунты на 3–4 м и имеют гидроизоляционный слой по дну и стенкам. Однако с момента начала эксплуатации этих сооружений прошло уже несколько десятков лет: изоляционный слой, изначально не рассчитанный на постоянное взаимодействие с жидкостями, постепенно становится проницаемым и отходы частично поступают в окружающую среду. Поскольку уровень грунтовых вод (УГВ) на площадке расположен на глубине всего ~2.5 м под дном хранилищ, вследствие инфильтрации отходов в грунтовых водах участка сформировалась гидрохимическая аномалия. Эта аномалия характеризуется высокой общей минерализацией, достигающей в отдельные моменты  $n \times 10$  г/л при фоновых значениях  $\sim n \times 10^{-1}$  г/л, а также гидродинамическим

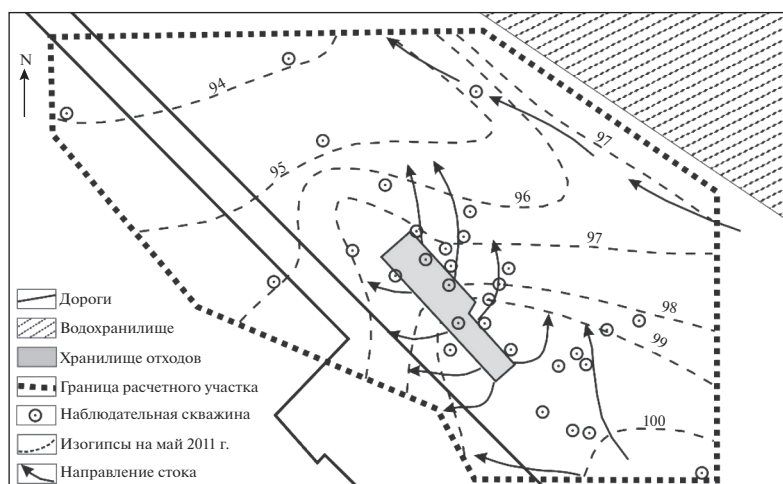
куполом растекания. Распространение загрязнения контролируется предприятием через сеть наблюдательных скважин, оборудованных по направлению движения грунтовых вод.

Основные контролируемые параметры в скважинах – УГВ, температура, общая минерализация, pH, Eh и химический состав подземных вод, выраженный через основные анионы и катионы. Исходное исследование проведено с использованием данных, полученных специалистами Института геологии и минералогии СО РАН [5]. Для моделирования распространения загрязнения выбраны среднегодовые отметки УГВ. Численные значения общей минерализации – условно-расчетные, без выделения отдельных соединений – классифицировались как фоновые (0–1, пресные), средние (1–2), высокие (>2 г/л). Химический состав стоков, а также их взаимодействие с фоновыми водами и вмещающими грунтами в этих расчетах не рассматривались. Ведущим фактором снижения величины общей минерализации принято разбавление стоков подземными водами. Для полноты демонстрации возможностей метода добавлены модельные условные данные к отдельным натурным данным, полученным с 2011 по 2015 г.

Еще одна немаловажная характеристика грунтов для моделирования распространения высокоминерализованных растворов – водопроницаемость вмещающих пород. Рассматриваемый участок в инженерно-геологическом отношении относится к категории простых (субгоризонтальное залегание двух литологических разностей). Под почвенно-растительным слоем до глубины 4.5–10.0 м залегают аллювиальные мелко-среднезернистые пески с прослоями и линзами супесей и суглинков. В минеральном составе преобладают кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, слюда, каолинит. Коэффициент пористости слоя принят по данным инженерно-геологических изысканий на соседнем участке и составляет 0.57. Нижележащий слой представлен выветрелыми песчаниками. В минеральном составе преобладают кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, каолинит, смектит, слюда, иллит-смектит, вермикулит. Коэффициент пористости слоя – 0.36.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдательные скважины на участке расположены с учетом направления движения грунтовых вод, а также сформировавшегося под сооружениями гидродинамического купола растекания (рис. 1). В связи с этим скважины с северо-восточной и юго-восточной сторон хранилищ расположены наиболее равномерно, в северо-западном и юго-западном направлениях расстояния между скважинами увеличиваются, а количество самих скважин уменьшается. Чтобы просчитать



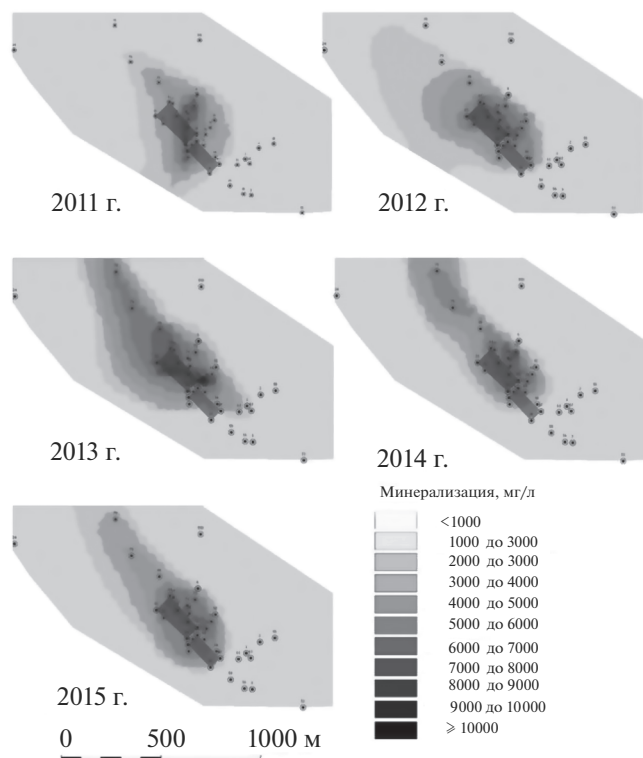
**Рис. 1.** Схема расположения наблюдательных скважин в границах расчетной блочной модели гидрохимической аномалии.

объемы загрязнений, зафиксированные в водах скважин, было необходимо построить равномерную схему распространения минерализации по всему расчетному участку. Расчеты проводились на основе данных мониторинга УГВ и химического состава подземных вод. Динамика распространения загрязнения специально не рассчитывалась и принята по фиксированным изменениям рассчитанных объемов от года к году. Поток подземных вод принят как схематичный плоский, за основной химический процесс взаимодействия загрязненных и природных вод принято разбавление.

Прежде всего были заданы пространственные границы участка, которые послужили основой для дальнейших расчетов объемов загрязненных подземных вод. Очертания участка в плане (рис. 1) обоснованы расположением наиболее близких к хранилищам скважин с постоянными фоновыми значениями грунтовых вод. Срез с юго-западной стороны участка обусловлен отсутствием скважин на приемлемом для расчетов расстоянии, а срез с северо-восточной стороны — наличием водохранилища, вода которого образует своеобразную “подпорную стену” для загрязненных вод. На данном этапе интересует распространение загрязнения только в водной среде, поэтому по вертикали расчетный объем ограничивали УГВ сверху, а нижняя граница проведена по забою самой глубокой скважины на площадке (19.9 м), она приблизительно совпадает с водоупором. Кроме того, выделена еще одна субгоризонтальная поверхность: подошва слоя аллювиальных песков. Эта поверхность разграничивает литологические слои с различной пористостью. Мониторинг наблюдательных скважин показывает изменчивость УГВ и общей минерализации от года к году.

Первый этап моделирования проведен при помощи программного комплекса ArcGIS. Построены интерполяционные схемы по каждой горизонтальной поверхности — по распределению минерализации и по УГВ методом обратно-взвешенных расстояний (ОВР) отдельно для каждого года. Суть метода ОВР заключается в определении значения для каждой ячейки сетки с использованием функции обратного расстояния. При расчете метод ОВР учитывает обратное значение расстояния, возведенное в математическую степень. Параметр “Степень” позволяет контролировать влияние минерализации в известных точках на интерполируемые значения, что основано на расстоянии от точек из поднабора до результирующей точки. По умолчанию, обычно используется степень 2, но при более высоких степенях более важными становятся более близкие точки. Поскольку количество скважин на исследуемой площади небольшое, а расстояние между некоторыми скважинами значительное, то наилучший результат интерполяции достигнут при степени 3. Таким образом, получены интерполяционные схемы для смоделированных данных 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг. Далее эти данные были переведены в точечный файл с расстоянием между точками 50 м. Сформирована база, включающая в себя данные по минерализации за пять указанных лет, по УГВ за эти же годы и координаты расположения скважин в пространстве  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Далее был вычислен УГВ в абсолютных высотах, который в дальнейшем использовался в качестве координаты  $Z$  в “Micromine”.

Как отмечено выше, для каждой интерполированной ячейки получены численные значения минерализации, они присвоены скважинам по всей рассчитываемой мощности водоносного го-



**Рис. 2.** Распространение загрязненных подземных вод в границах расчетной блочной модели гидрохимической аномалии по данным разных лет. Точками с номерами обозначены наблюдательные скважины. Цветом выделены зоны с различной минерализацией, мг/л. Темные прямоугольники — места размещения емкостей хранения.

ризонта по вертикали от УГВ до подошвы водонасыщенного слоя. Такое обобщение считаем возможным, поскольку в соответствии с [4] при отборе гидрохимических проб из наблюдательных скважин проводится трехкратная откачка воды, после восстановления УГВ проводят забор воды из середины установившегося столба воды. Величины минерализации воды выше УГВ приняты равными нулю и в расчет не принимались.

Второй этап моделирования — трехмерный, он проводился при помощи ГГИС “Micromine”. База данных скважин включает в себя координаты и величины минерализации как исходные, так и полученные в ходе интерполяции. Для расчета общего объема загрязненных грунтовых вод создана серия пустых блочных моделей для каждого года, ограниченная соответствующим УГВ. Далее в каждой блочной модели были рассчитаны значения общей минерализации подземных вод по каждому году соответственно (рис. 2). Оценка достоверности моделирования по каждому году составила, мг/л: 2011 — 0.19, 2012 — 0.28, 2013 — 0.33, 2014 — 0.26, 2015 — 0.27. В целом погрешности при моделировании в ГГИС минимальны и составили  $\leq 5$  мг/л.

Поскольку водоносный горизонт включает в себя два литологических слоя с разными величинами коэффициента пористости, то построенную блочную модель разделяли на две части. Поверхностью раздела послужила подошва слоя аллювиальных песков. Далее объем пор, заполненных водой, по каждому слою рассчитывался отдельно. Для упрощения расчета принято, что межзерновое пространство в грунтах на 100% заполнено водами различной минерализации. В данной работе не учитываются процессы растворения минералов, слагающих грунты, и формирование вторичных минеральных образований под действием высокоминерализованных растворов. Авторы полагают, что изменение объема порового пространства, вызванное этими процессами, не имеет значительного влияния на общий рассчитываемый объем. Расчетные значения получены оценкой блоков 3D для каждого года.

Расчетные объемы загрязненных подземных вод каждого выделенного класса по минерализации (средняя 1–2 г/л, высокая >2 г/л) приведены в табл. 1 для 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.

Полученные модели распространения загрязненных вод свидетельствуют о некотором гори-

**Таблица 1.** Относительные расчетные объемы (%) загрязненных подземных вод в границах блочной модели гидрохимической аномалии

Общая минерализация подземных вод, г/л	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
<1	75	61.7	63.9	74.5	71.4
1–2	10.5	18.5	7.4	6	8.4
>2	14.5	19.8	28.7	19.5	20.2

зонтальном смещении загрязненных зон в северном направлении, совпадающем с направлением движения грунтовых вод. Также в течение рассматриваемого периода (с 2011 по 2015 г.) на участке несколько снижается количество загрязненных вод, которые постепенно замещаются фоновыми пресными водами. Выделяющиеся показатели за 2013 г. могут быть объяснены какими-либо внешними факторами, например изменением химического состава поступающих загрязненных вод. Однако, несмотря на однократное перераспределение количества средне- и высокоминерализованных вод, отчетливо проследивается тенденция к снижению объемов последних. Такое распределение одновременно со смещением загрязненной зоны в пространстве может свидетельствовать о постепенном “размывании” (разбавлении) гидрохимической аномалии вновь поступающими фоновыми грунтовыми водами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наблюдательных скважин в ГГИС “Micromine” построена расчетная трехмерная блочная модель гидрохимической аномалии. Основой для расчета стали данные общей минерализации подземных вод и УГВ, а также литологические характеристики вмещающих пород. Многолетние наблюдения позволили создать модели по каждому году, по которому имелись данные, что, в свою очередь, дало возможность проследить динамику распространения загрязнений в водоносном горизонте. Расчеты показали некоторое смещение объема загрязненных вод по направлению движения грунтовых вод на протяжении наблюдаемых пяти лет (с 2011 по 2015 г.). Это смещение одновременно с перераспределением количества вод разной минерализации может свидетельствовать о постепенном “размывании” (разбавлении) гидрохимической аномалии вновь поступающими фоновыми грунтовыми водами.

Предложенная технология создания модели использует небольшой набор характеристик гидрогеологической системы, но возможности ГГИС “Micromine” позволяют провести модели-

рование и для более сложных условий, чем в данном случае, а также учитывать большее количество характеристик в расчетах. Таким образом, эта программа может быть полезна для решения и гидрогеохимических, и геоэкологических задач. На основе подобных расчетов возможно прогнозирование распространения загрязнений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басаргин А.А.* Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной системы Micromine // Сб. материалов междунар. науч. конф. “Интерэкс-по Гео-Сибирь 2015”. Т. 1. № 1. С. 15–20.
2. *Гревцев Н.В., Александров Б.М., Егошина О.С.* Комплексная оценка запасов торфяного месторождения с использованием ГИС-технологий // Изв. вузов. Горный журн. Екатеринбург: УГГУ, 2016. Т. 2. С. 93–99.
3. *Евдокимова Н.К., Харитонова Л.Я., Алексеева А.К.* Нефтегазоперспективность юга Лаптевоморского шельфа по результатам современной обработки геолого-геофизических данных // Сб. статей “Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона” 2006. Т. 210. № 6. С. 49–56.
4. Методические рекомендации по организации и ведению мониторинга подземных вод на мелких групповых водозаборах и одиночных эксплуатационных скважинах. М.: Минприроды России, 2000.
5. *Boguslavskiy A.E., Gaskova O.L., Shemelina O.V.* Uranium Migration in the Ground Water of the Region of Sludge Dumps of the Angarsk Electrolysis Chemical Combine // Chem. Sustainable Development. 2012. V. 20. № 5. P. 515–529.
6. *Kuznetsov Yu.N., Stadnik D.A., Stadnik N.M., Kurtsev B.V.* Automatic recognition of the geostructures in the sheet deposits // Gornyi Zhurnal. 2016. V. 2016 (2). P. 86–91.
7. *Li Y.-S., Qin D.-X., Cai Y., Chen A.-B., Yu Y.-X., Pu C.-J., Lin X.-P.* Three-dimension mathematical model of the Dahongshan iron ore deposit in Yunnan Province // Bull. Mineral. Petrolo. Geochem. 2004. V. 23 (4). P. 332–335.
8. *Qiu S., He B.B., Bai X.J., Li X., Liao Z.M., Yin C.M.* A mineral resources quantitative assessment and 3D visualization system // IEEE IGARSS. Milan, 2015. P. 4554–4557.
9. *Vasileva M.A., Katkov S.M.* Prediction of possible tectonic disturbance zones using rock mass strength char-

- acteristics in Micromine // *Gornyi Zhurnal*. 2017. V. 7. P. 88–91.
10. *Zaychenko A.P., Domarenko V.A., Perehudina E.V.* Internal architecture of ore-bearing structure of complex gold-uranium deposit Severnoe (Elkon uranium ore region) // *Bull. Tomsk Polytechnic Univ. Geo Assets Engineering*. 2015. V. 326 (9). P. 78–86.
  11. *Zhang L.-S., Zhang Z., Wang Y., Chen J.-P.* Establishment of 3D solid model for Meilinggou coalfield in Chengde area, Heibei, China // *Geol. Bull. China*. 2009. V. 28 (1). P. 146–149.