ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА
2018, № 1

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 624.131.1

ИЗМЕНЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ (НА ПРИМЕРЕ КМА)

О.М. ЖИТИНСКАЯ[1], Л.А. ЯРГ[2]

[1]Старооскольский филиал Российского государственного геологоразведочного университета
14/13, Ленина ул., Старый Оскол 309530, Россия
e-mail: gonjarova_o@mail.ru

[2]Российский государственный геологоразведочный университет
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

Рассмотрено влияние процессов функционирования локальных природно-технических систем «Стойленское» и «Лебединское» месторождения на геологическую среду с использованием информации, полученной в 2004—2015 гг. в рамках мониторинга. Приведены результаты анализа временных рядов и установленные тренды в изменении компонентов геологической среды: уровня подземных вод; химического состава подземных вод; инженерно-геологических процессов. Предложены способы оптимизации режимных наблюдений в части их размещения и периодичности во времени. Разработанный способ оценки текущего состояния природно-технической системы позволяет сократить число наблюдений, не снижая качества информации. Пространственная структура и временной режим мониторинга должны корректироваться в соответствии с получаемой информацией. Данные, полученные на месторождениях Лебединское и Стойлинское, могут быть использованы при проектировании и разработке месторождений со сходными геологическими условиями.

Ключевые слова: Курская магнитная аномалия; геологическая среда; природно-техническая система (ПТС); мониторинг; водоносные горизонты; уровень подземных вод; химический состав подземных вод; инженерно-геологические процессы.

CHANGES IN THE COMPONENTS OF THE NATURAL ENVIRONMENT WITH THE LONG-TERM DEVELOPMENT IN THE OPENCAST MINES (THE CASE OF KMA)

O.M. ZHITINSKAYA[1], L.A. YARG[2]

[1]Starooskolsky branch of the Russian State Geological Prospecting University
14/13 Lenina st., the city of Stary Oskol 309530, Belgorod region, Russia
e-mail: gonjarova_o@mail.ru

[2]Russian State Geological Prospecting University
23 Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia

The influence of the processes of functioning of the local natural-technical systems (NTS) «Stoilenskoe» and «Lebedinskoe» of the KMA deposit on the environment has been studied with the information obtained during the period of last 7—12 years (2004—2015 y.y.). Results of the analyses of time series and obtained trends in the geological components alteration (in particular, a) level of groundwater, b) chemical composition of groundwater, c) engineering and geological processes) have been given. The ways of regime observations optimization concerning their placement and frequency in time have been offered. The proposed way of the assessment of the current state of NTS allows reducing the observations number, without reducing quality of information. The spatial structure and the time mode of monitoring have to be corrected according to the obtained information. The data received from Lebedinskoye and Stoylinskoye fields can be used for design and development of the similar geological fields.

Keywords: Kursk Magnetic Anomaly; geological environment; natural-technical system (NTS); field; monitoring; aquifers; groundwater level; chemical composition of groundwater; engineering-geological processes.

Курская магнитная аномалия — крупнейший железорудный бассейн в мире площадью 125 тыс. км^2, расположенный в пределах Воронежской антеклизы Восточно-Европейской платформы.

Результаты исследования, изложенные в статье, получены в результате:

1) сбора и обобщения фондового материала по месторождениям КМА (Лебединское, Стойленское, Михайловское);

2) полевых работ по оценке устойчивости бортов, в том числе хвостохранилища Стойленского ГОК, включающих документацию состояния бортов;

3) опробование грунтов на физико-механические свойства пород для оценки устойчивости;

4) анализа и статистической обработки лабораторных данных о химическом составе подземных и техногенных вод.

На территории Белгородской области находятся 14 из 18 разведанных и учтённых государственным балансом месторождений железных руд КМА с запасами 51 млрд. т, в том числе промышленных категорий — 24 млрд. т (рис. 1). В Оскольском рудном районе расположено 9 месторождений, балансовые запасы которых представлены главным образом легкообогатимыми кварцитами [7, 16]. Богатые руды локализованы в отложениях докембрия на глубинах от 60 до 600 м.

Железные руды на Лебединском и Стойленском месторождениях добываются открытым способом.

В геологическом строении осадочного чехла месторождений принимают участие отложения (сверху вниз): песчано-глинистые четвертичные, средней мощностью 26 м; турон-коньяк-сантонского яруса, представленные мелом с прослоями мергелей, средняя мощность 55,4 м; альб-сеноманского яруса, сложенные плотными неоднородными по гранулометрическому составу песками с прослоями глин, мощность 35,4 м; юрско-неокомские, представленные песчано-алевритистыми и глинистой толщами, средняя мощность 13 м. Отложения девона (максимальная мощность 16 м) выполняют глубокие впадины в кристаллическом фундаменте докембрия (рис. 2). Рудно-кристаллический фундамент является сложноскладчатым, разбитым разрывными тектоническими нарушениями, представляющими собой зоны дробления и рассланцевания, сопровождающиеся зонами повышенной трещиноватости. Разрывные нарушения крутопадающие (65—85 °). Системы трещин и

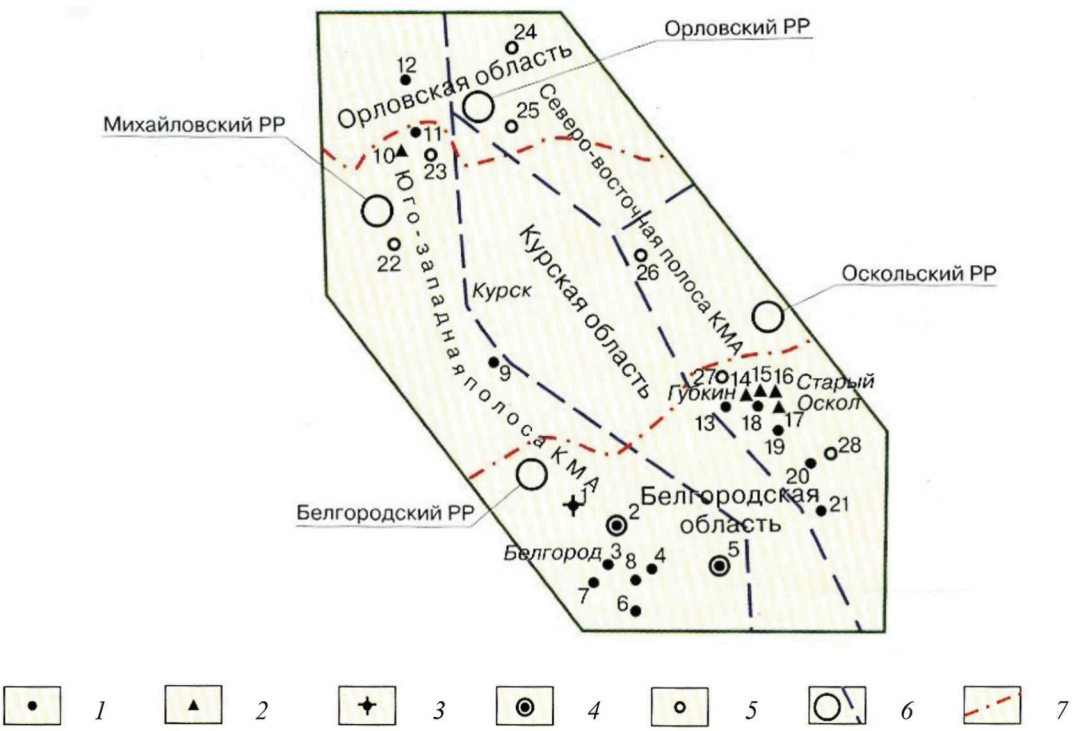

Рис. 1. Железорудные месторождения и перспективные участки бассейна КМА: 1–28 – месторождения и участки: 1 – Яковлевское; 2 – Гостищевское; 3 – Висловское; 4 – Мелихово-Шебекинское; 5 – Большетроицкое; 6 – Разуменское; *7* – Олимпийское; 8 – Соловьевское; 9 – Дичнянско-Реутское; 10 – Михайловское; 11 – Курбакинское; 12 – Новоялтинское; 13 – Осколецкое; 14 – Коробковское; 15 – Лебединское; 16 – Стойло-Лебединское; 17 – Стойленское; 18 – Салтыковское; 19 – Приоскольское; 20 – Чернянское; 21 – Погромецкое; 22 – Яценский участок; 23 – Лев-Толстовский участок; 24 – Орловский участок; 25 – Воронцовский участок; 26 – Щигровский участок; 27 – Панковский участок; 28 – Северо-Волотовский участок; *1* – разведанные месторождения; *2* – разрабатываемые месторождения; *3* – подготовленные месторождения к подземной разработке; *4* – готовящиеся месторождения к СГД; *5* – перспективные участки; *6* – рудные районы (РР); *7* – администрат- ративные границы областей

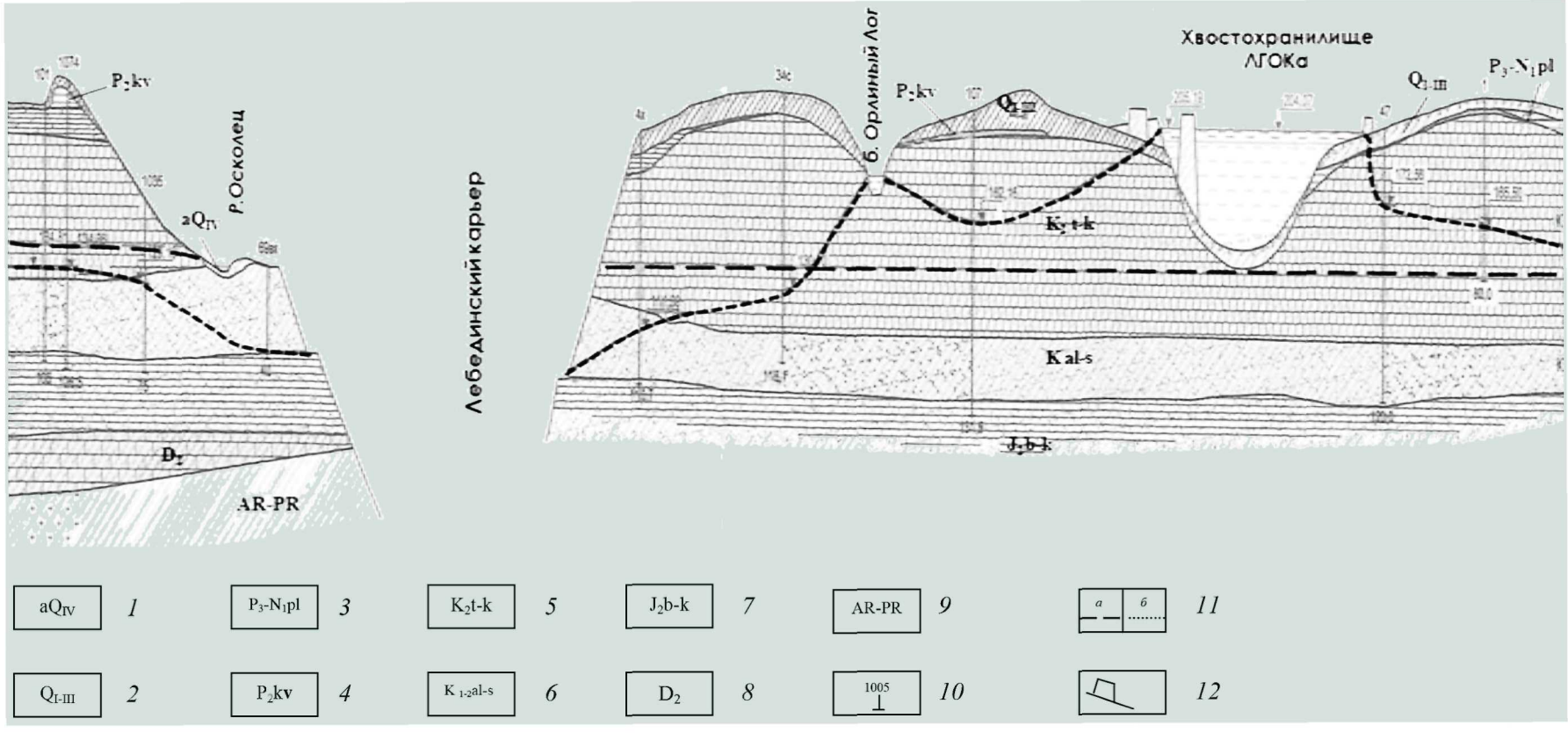

Рис. 2. Схематический инженерно-геологический разрез: *1* – современные аллювиальные отложения: пески, супеси, суглинки; *2* – нижневерхнечетвертичные отложения, погребённый аллювий: пески, супеси; *3* – неоген-палеогеновые отложения полтавской свиты, пески; *4* – палеогеновые отложения киевской свиты: глины; *5* – турон-коньякский ярус: белый писчий мел, мергель; *6* – альб-сеноманский ярус: глауконито-кварцевые пески; *7* – юрские отложения бат-келовейского яруса: глины, алевриты, пески; *8* – девонские отложения: известняки, пески, песчаники; *9* – докембрийские кристаллические образования: железистые кварциты, граниты, сланцы; *10* – геологическая скважина и её номер; *11* – тело дамбы; *12* – уровень подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта: *а* – в естественном, *б* – в нарушенном состоянии

Таблица 1

Характеристика водоносных горизонтов

Водоносный горизонт	Породы	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Напор, м
Четвертичный	Суглинки, пески, глины	2—20	—	Безнапорный
Коньяк-туронский	Мергели, мел	21—94	0,8—5,5	Безнапорный
Альб-сеноманский	Пески	25—40	7—12	10—15
Рудно-кристаллический	Руда кварцит	10—50 50	1—1,2 0,07—25	47 79,6

разломов расчленяют рудно-кристаллический массив на блоки.

Существование четырёх водоносных горизонтов: рудно-кристаллического, альб-сеноманского, турон-коньякского, четвертичного определило сложность гидрогеологических условий разрабатываемых месторождений. Кроме того, подземные воды являются причиной развития инженерно-геологических процессов в пределах локальных ПТС на всем протяжении эксплуатации месторождений.

КМА относится к категории региональных природно-технических систем (ПТС), структура которых состоит из локальных ПТС [3]. Локальная природно-техническая система (ЛПТС) «Месторождение» включает элементарные (ЭПТС): карьеры, хвостохранилища, гидроотвалы, отвалы вскрышной породы.

Разработка железных руд на Лебединском месторождении начата в 1959 г., к настоящему времени размеры карьера в плане составляют 5×3 км, глубина — 410 м. Эксплуатация Стойленского месторождения ведётся с 1969 г, размеры карьера (по дневной поверхности) составляют около 2,3×2,5 км, глубина — 350 м [8].

Основной водной артерией является р. Оскол и её притоки Осколец и Чуфичка, в долинах которых созданы гидроотвалы и хвостохранилища. В бассейне р. Осколец в 1965 г. был создан гидроотвал Берёзовый Лог ёмкостью 120 млн. м^3, в настоящее время он рекультивирован. В долине р. Чуфичка сооружено два хвостохранилища Лебединского и Стойленского месторождений. Лебединское хвостохранилище создано в 1972 г. для сброса использованных в производственном процессе вод, накопления пылевато-глинистой фракции (хвостов), проектная ёмкость 370 млн. м^3 [11]. Стойленское хвостохранилище сооружено в 1986 г. ниже по течению р. Чуфичка для отстоя пульпы с обогатительной фабрики.

Осушение Лебединского и Стойленского карьеров осуществляется комбинированным способом с применением подземного дренажного комплекса, перехватывающего основную часть потока подземных вод за пределами карьеров по их контуру и внутрикарьерными дренажными комплексами: дренажными канавами, горизонтальными дренажными скважинами.

Зонами разгрузки надъюрского водоносного комплекса являются дренажные системы, борта карьера, водозаборы и долина р. Осколец при региональном направлении потока с северо-востока на юго-запад.

Оценка влияния функционирования объектов на геологическую среду ведётся на основании информации, получаемой в рамках мониторинга [13]. Параметрами наблюдения являются: уровень подземных вод, их химический состав, состояние бортов карьеров, отвалов и откосов дамб хвостохранилищ. Продолжительность наблюдательных рядов составляет соответственно для Стойленского месторождения 12 лет (с 2004 по 2015 гг.), для Лебединского — 7 лет (с 2007 по 2013 гг.) [8]. Периодичность наблюдений за уровнем подземных вод 1 раз в месяц, для химического состава подземных вод — 1 раз в квартал. Характеристика водоносных горизонтов приведена в табл. 1.

В результате анализа временных рядов за столь продолжительный период выявлены основные тенденции изменения компонентов геологической среды.

Изменение уровня подземных вод. Техногенный режим подземных вод, формирующийся при вскрытии месторождения, характеризуется определёнными новыми закономерностями.

В пределах месторождений сложный гидродинамический режим подземных вод обусловлен: во-первых, развитием депрессионной воронки, масштабы (диаметр и глубина) которой возрастают по мере увеличения размеров карьера; во-вторых, формированием купола растекания под хвостохранилищем, динамика которого тесно связана с производственными процессами добычи полезного ископаемого.

При длительной работе дренажных систем происходит сработка статических запасов подземных вод и вовлечение в процесс динамических ресурсов, зависящих от условия питания и разгрузки. В первый период эксплуатации Лебединского месторождения сработка статических запасов надъюрского водоносного комплекса привела к тому, что в 1966 г. через 10 лет после начала его строительства при понижении уровня на 43 м образовалась депрессионная воронка радиусом влияния в южном направлении 11 км, в северном — около 9 км.

Осушение месторождения, снижение уровней грунтовых и напорных вод создают благоприятные условия для инфильтрационного питания подземных вод дождевыми, талыми водами, водами ручьев и техногенных водоёмов (хвостохранилищ, прудов-отстойников).

Именно этим объясняется повышение уровней подземных вод в период снеготаяния и обильных осадков и снижение уровней в остальное время года (рис. 3). Инфильтрационные потери из гидроотвала «Березовый Лог» на Лебединском карьерном поле в 1970—1972 гг. достигли 1200—1500 м^3/г, в результате уровень «подпитываемого» надъюрского горизонта под гидроотвалом повысился на 15 м [15].

На территории Стойленского месторождения с 2004 по 2015 гг. по графикам, построенным по данным режимных наблюдений, прослеживается тренд снижения уровня подземных вод в водоносных горизонтах: в рудно-кристаллическом на 8,7 м, в альб-сеноманском — 2,2 м, в турон-коньякском — 1,3 м [9].

Графики изменения уровня подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта с 2006 по 2015 гг. приведены на рис. 3. С начала работы дренажной системы к настоящему времени турон-коньякский водоносный горизонт в центре депрессии полностью сработан. Уровень подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта на участке расположения карьера снижен более чем на 40 м (рис. 2) [6].

Подобный анализ изменения уровня альб-сеноманского водоносного горизонта за 7-летний период выполнен по Лебединскому месторождению в различных направлениях. К северу от карьера снижение уровня в год составило 0,30 м, к югу — 0,36 м, к западу — 0,15 м, к востоку — 0,93 м [10]. Различия положения уровней депрессионной воронки обусловлены работой дренажной системы соседнего Стойленского карьера, находящегося в 8 км к востоку от Лебединского.

Длительная эксплуатация месторождения ведёт к полной сработке питьевых вод в малых населённых пунктах, расположенных вблизи месторождения.

На динамику уровней подземных вод заметное влияние оказывают хвостохранилища, являющиеся техногенной областью питания турон-коньякского водоносного комплекса. Анализ результатов мониторинга уровенного режима подземных вод мелового водоносного комплекса в районе Стойленского хвостохранилища показал, что общий подъём уровня с 1999 по 2015 гг. составил 3 м. Подъём уровня подземных вод во всех направлениях зафиксирован до 2008 г. В период 2008—2015 гг. происходит его стабильное понижение. Прекращение роста уровня воды на описываемом участке с последующим его падением, по всей видимости, связано со снижением инфильтрационных потерь из хвостохранилища в связи с ростом мощности хвостов песчано-глинистого состава [6].

В районе расположения хвостохранилища Стойленского месторождения в целом отмечается высокое положение уровня подземных вод как в турон-коньякском, так и в альб-сеноманском водоносных горизонтах. За счёт инфильтрационных потерь из технического водоёма под ним и на прилегающей территории образовался купол растекания (рис. 2). За время существования хвостохранилища максимальный подъём уровня подземных вод по сравнению с естественным режимом достиг 25 м и более [6]. Аналогичная ситуация фиксируется и в районе хвостохранилища Лебединского месторождения [5, 8, 15].

Хвостохранилища превращаются в область техногенного питания водоносных горизонтов.

Существующий массив данных о гидрогеологических условиях позволяет оптимизировать используемые в настоящее время методы оценки необходимой информации. Обоснован алгоритм оптимизации информации, включающий:

1) разделение полей гидрогеологических на области, отличающиеся гидрогеологическим режимом;

2) установление тренда в изменении измеряемых параметров;

3) оптимизацию числа наблюдений и их размещение.

В пределах Стойлинского месторождения возможно выделить две области, различающиеся гидродинамическим режимом: область депрессионной воронки и область купола растекания. Область влияния купола растекания устанавливается на основе анализа карт гидроизогипс и данных режимных наблюдений в рамках мониторинга.

Графики изменения уровней подземных вод во времени содержат флуктуации, относящиеся к периодам снеготаяния и обильных осадков и снижение уровней в остальное время года (рис. 3).

Оптимизация системы наблюдения за уровнем подземных вод по результатам анализа временных рядов. Для обоснования перевода системы мониторинга за подземными водами с ежемесячных замеров на ежеквартальные были использованы две выборки значений (по данным замеров скв. 15). В качестве инструмента исследования был использован анализ временных рядов.

В теории временных рядов разработаны различные методы исследования: корреляционный и спектральный анализ, методы сглаживания и фильтрации, модели авторегрессии и скользящего среднего [1, 2, 12]. Авторами для решения поставленной задачи предлагается алгоритм, включающий корреляционный анализ и метод скользящего среднего. Временные ряды результатов наблюдений за изменением уровня подземных вод ту-

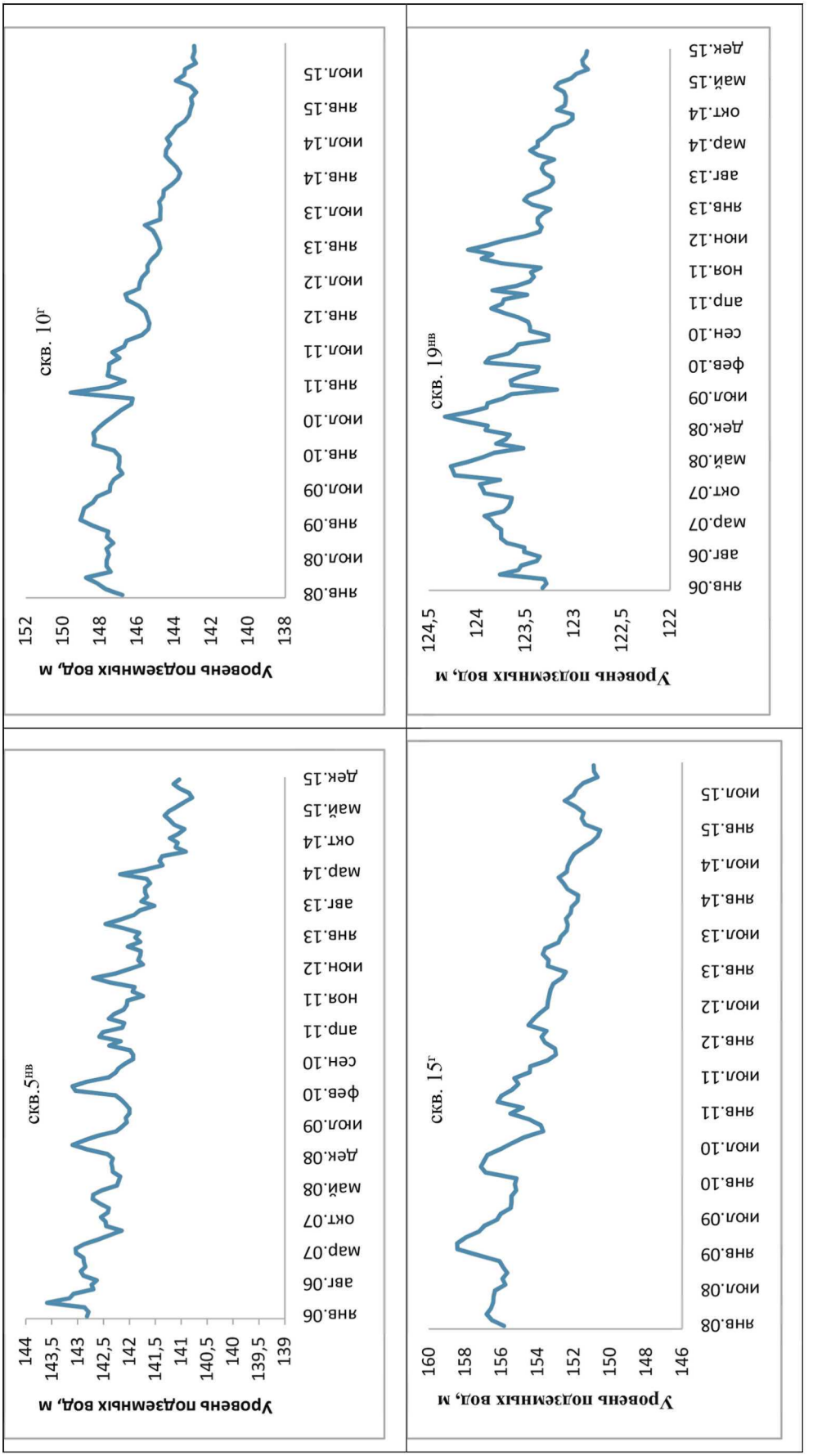

Рис. 3. Графики изменения уровней подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта (2006—2015 гг.): скв. 15г – номера скважин

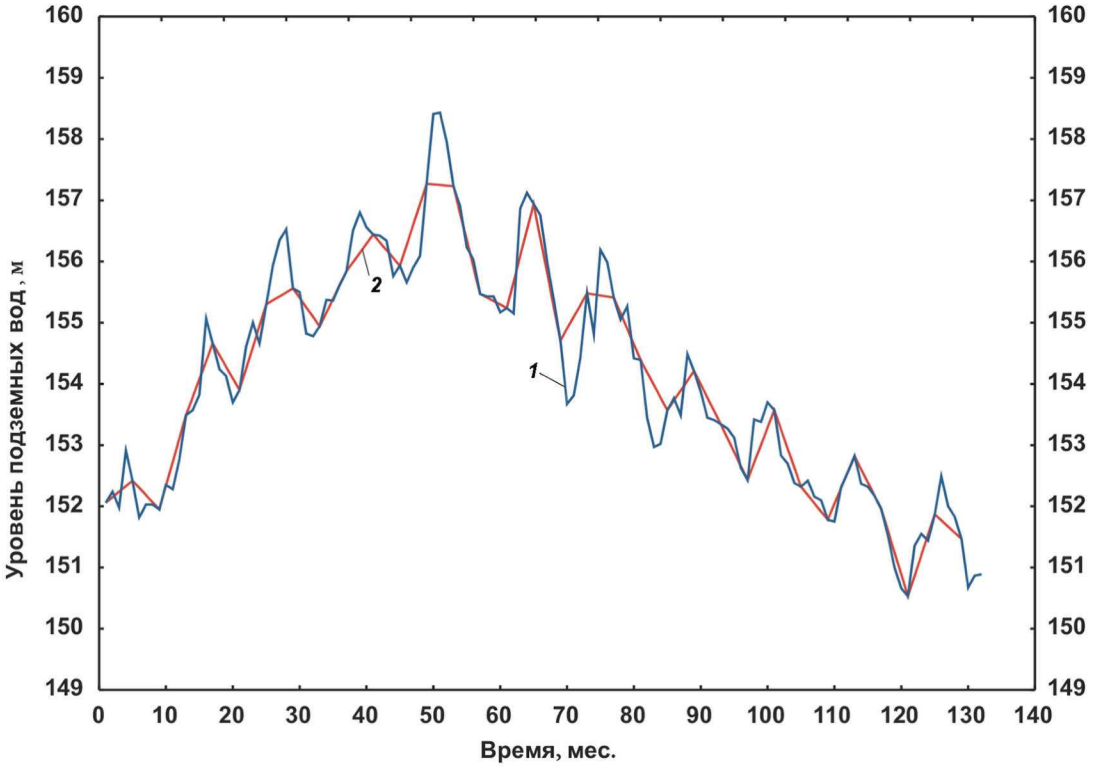

Рис. 4. Временные ряды замеров уровня подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта **(2006—2015 гг.):** *1* – график ежемесячных замеров уровня подземных вод, *2* – график ежеквартальных замеров уровня подземных вод

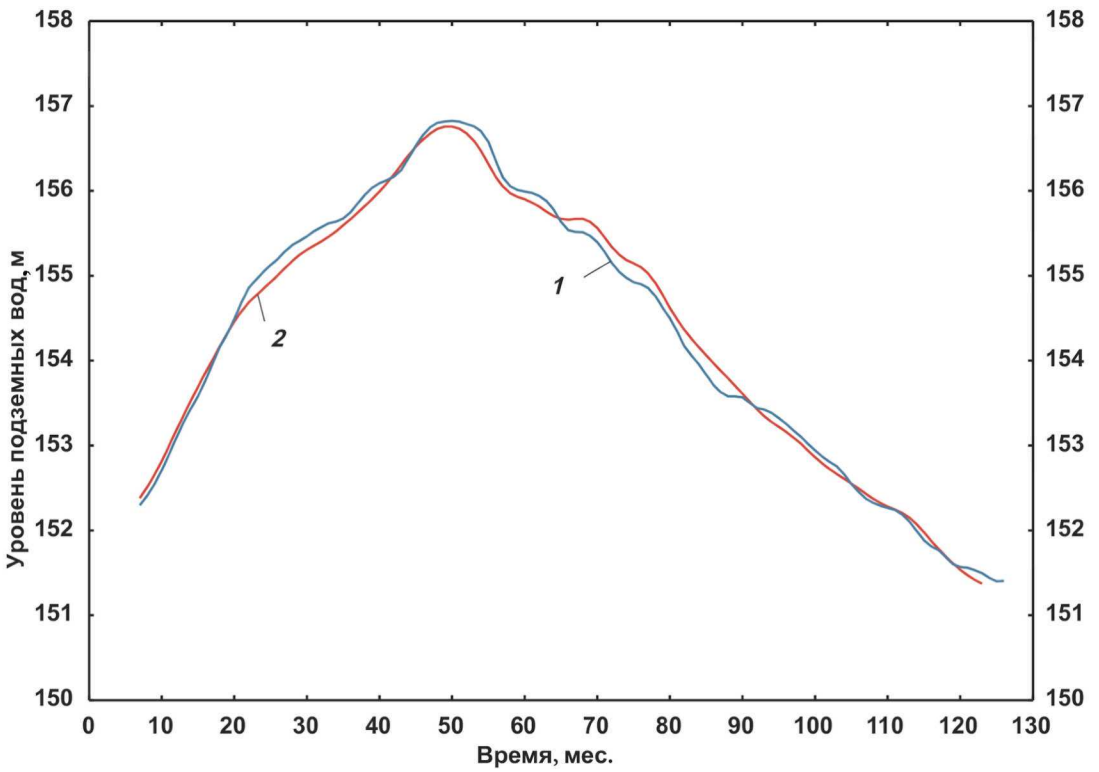

Рис. 5. Графики скользящего среднего: *1* – ежемесячные замеры уровня подземных вод, *2* – ежеквартальные замеры уровня подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта

рон-коньякского водоносного горизонта представлены на рис. 4. В ходе анализа были использованы две выборки данных: первая выборка включала ежемесячные данные по замерам уровня подземных вод, вторая — ежеквартальные.

Для выявления общих тенденций изменения уровня подземных вод и с целью его прогноза на основе рассмотренных выше временных рядов были построены графики скользящего среднего (рис. 5).

Для прямолинейного участка выполнен прогноз изменения уровня подземных вод во времени (рис. 6).

В процессе аппроксимации временных рядов установлено, что уравнение линейного тренда по ежемесячным и ежеквартальным замерам совпадает (с точностью входящих в него коэффициентов до второго знака), при достоверности аппроксимации.

Для оценки связи между фактическими временными рядами ежемесячных и ежеквартальных замеров был выполнен корреляционный анализ (рис. 7), доказавший наличие тесной связи между анализируемыми рядами наблюдений (коэффициент корреляции 0,97).

Таким образом, можно сделать вывод, что система наблюдений за уровнями подземных вод может быть существенно оптимизирована за счёт перехода от ежемесячных наблюдений к ежеквартальным. При этом качество получаемых результатов сохраняется.

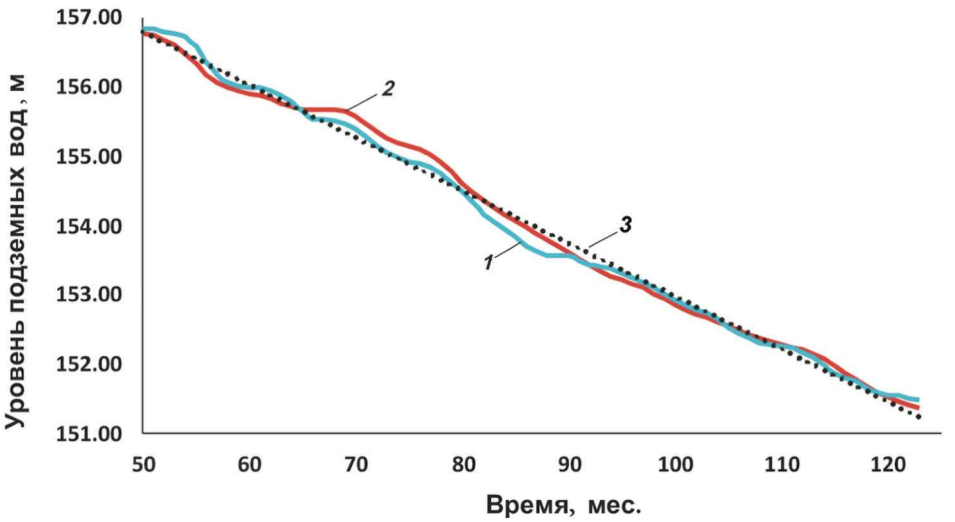

Рис. 6. Тренд изменения уровня подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта во времени по данным многолетних режимных наблюдений $Y = -0{,}07\,X + 160{,}6$, достоверность аппроксимации $R = 0{,}99$: *1* – точки ежемесячных замеров уровня подземных вод; *2* – точки ежеквартальных замеров уровня подземных вод; *3* – линейный тренд

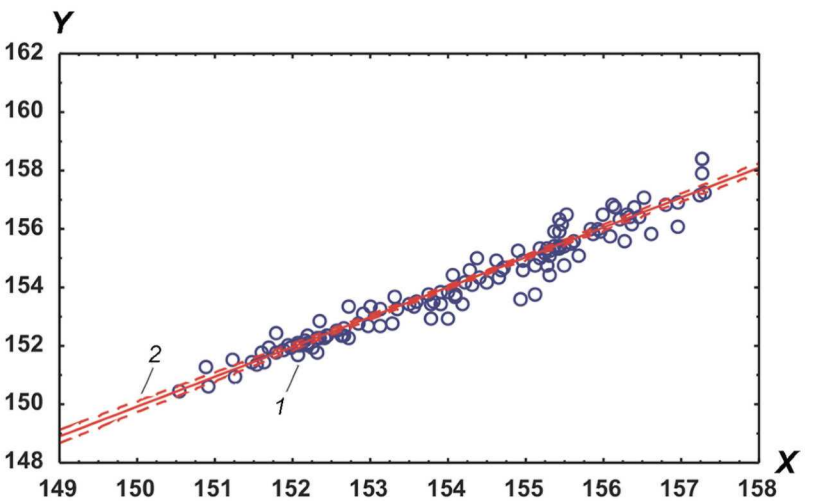

Рис. 7. Корреляционный график между временными рядами ежемесячных и аппроксимированных ежеквартальных замеров: *1* – точки экспериментальной основы корреляционной зависимости ежемесячных и аппроксимированных ежеквартальных замеров уровня подземных вод турон-коньякского водоносного горизонта, *2* – линия аппроксимации

Изменение химического состава подземных вод в ходе эксплуатации месторождения. Подземные воды представляют сложную многокомпонентную среду. В целом реальные гидрогеохимические системы в термодинамическом отношении являются открытыми и неравновесными системами. Длительный водообмен при малых скоростях движения подземных вод приводит к частичному равновесию в системе вода—горная порода—газ. Среди причин и условий, влияющих на изменение химического состава подземных, — динамика подземных вод при вскрытии и длительной разработке месторождения. Снижение уровней подземных вод, изменение градиентов напора и скорости потока нарушают механизм взаимодействия между твёрдой и жидкой фазами. В условиях снижения напоров подземных вод и падения уровней происходит перетекание вод из верхних горизонтов, что приводит к возрастанию минерализации подземных вод.

Проблеме изменения химического состава подземных вод под влиянием искусственных факторов на основе теории и методов массопереноса посвящены работы Н.Н. Веригина, В.М. Гольберга, В.М. Шестакова, С.Р. Крайнова, В.М. Швеца [13]. Общей причиной протекания процессов массопереноса способом молекулярной диффузии или одновременно конвекции и молекулярной диффузии является изменение градиентов концентраций, температуры и давления как в водной системе, так и в сложной системе вода—порода—газ. Для техногенных типов подземных вод характерны временные изменения кислотно-щелочных равновесий и соответственно pH. Это связано с преобразованием карбонатных равновесий. Изменение окислительно-восстановительного состояния подземных вод вызывает изменение зарядов ионов с переменной валентностью, ведущее к усилению или снижению миграционной способности элементов в воде. Разработка *железорудных месторождений* приводит к возрастанию концентрации нормируемых компонентов и микрокомпонентов в водах турон-коньякского и альб-сеноманского горизонтов. Это связано с поступлением из отвалов, хвостохранилищ, дамб в подземные воды «новых микрокомпонентов» (F^-, Zn, Cr^{6+}, Ni, Co, B^{2+}, Cd, Mn, Mo, Pb, Al, Cu) [17], что приводит к нарушению естественных физико-химических равновесий в системе вода—горная порода—газ и созданию неравновесного состояния.

Фоновые концентрации компонентов в настоящее время полностью изменены на расстоянии в несколько сотен километров. О влиянии длительной разработки месторождения можно судить по данным о химическом составе подземных вод в период геологической разведки месторождения, в начальных этапах вскрытия карьера и в настоящее время.

В период геологической разведки месторождения химический состав надъюрского водоносного комплекса (в дальнейшем разделённого на отдельные водоносные горизонты) содержал (в мг/л): гидрокарбонатов 110, сульфатов 5, хлоридов 11, кальций 18, магний 6, натрий, сухой остаток 137, при минерализации 192. После шести лет разработки карьера химический состав вод турон-коньякского водоносного горизонта изменён. Содержание увеличивается до (в мг/л): гидрокарбонатов 242, ионов сульфатов 64, ионов хлоридов 12, кальция 78, магния 13, натрия 14, сухой остаток 318. Анализ данных о современном химическом составе подземных вод (2015 г.) показал еще более существенные его изменения.

Подземные воды турон-коньякского водоносного горизонта на протяжении ряда лет по химическому составу подразделяют на четыре типа: гидрокарбонатно-кальциевый, гидрокарбонатный магниево-кальциевый, сульфатно-гидрокарбонатный натриево-кальциевый и гидрокарбонатный магниево-натриево-кальциевый. За 12-летний период исследований увеличено содержание в воде ионов сульфатов до 70, железа общего до 3,46 мг/л (0,3 мг/л).

В пределах *железорудных* месторождений существенное влияние на миграционную подвижность компонентов оказывает железо. «Геохимию железа в подземных водах определяют следующие его свойства: малая растворимость гидроксида трехвалентного железа и соединений двухвалентного железа со многими анионами подземных вод; способность к образованию устойчивых комплексных соединений с CO_3^{2-}, SO_4^{2-} и органическим веществом» [13].

Выщелачивание карбонатов из карбонатных пород (писчий мел, мергель) и ионообменная сорбция глинами юры ограничивают миграцию железа в кислородсодержащих водах и приводят к накоплению его в подземных водах до значительных концентраций в водах турон-коньякского водоносного горизонта.

В альб-сеноманском водоносном горизонте вода локально имеет повышенную жесткость до 17,9 мг-экв/л (ПДК 7 мг-экв/л), превышение сухого остатка до 1909 мг/л (ПДК 1000 мг/л), содержанию натрия до 509,7 (200), кремния до 19,83 (10), марганца 0,32 мг/л (0,1 мг/л) и окисляемости перманганатной до 311,50 мгO_2/л (ПДК 5 мгO_2/л).

Грунтовые воды четвертичного водоносного горизонта практически повсеместно характеризуются повышенной жесткостью 12,8 мг-экв/л (ПДК 7 мг-экв/л). На локальных участках отмечено превышение в воде: сухого остатка до 2283 мг/л (ПДК 1000 мг/л), ионов хлоридов до 1073 (350), кремния до 22,39 (10), нефтепродуктов до 0,32 (0,1); из микрокомпонентов: превышение содержания марганца до 0,13 (0,1) и алюминия до 0,92 мг/л (0,5 мг/л) [6, 11].

Существующие анализы подземных вод, характеризующие качество вод для питьевого водоснабжения, не содержат информации, необходимой и достаточной для оценки миграционной подвижности компонентов в подземных водах рассматриваемых месторождений. Длительные систематические наблюдения за изменением химического состава подземных вод в процессе эксплуатации месторождения позволят: 1) определить генетическую природу временных изменений химического состава подземных вод; 2) разработать методы прогноза изменения качества подземных вод при эксплуатации месторождений подобного типа с учётом происходящих при этом гидрогеохимических явлений.

Активизация инженерно-геологических процессов. Карьерное поле характеризуют следующие параметры: суммарная длина фронта карьера, рельеф поверхности карьера, уступы, их число, высота и угол заложения, бермы, отвалы. Высота уступов определяется составом пород, условиями их залегания, блочностью и трещиноватостью массива.

Толща осадочных пород, мощностью до 170 м подстилается сложноскладчатым комплексом метаморфических пород докембрия. В основном месторождения Лебединское и Стойленское представлены железорудная коробковская свита и подстилающая её стойленская свита (мощность 159—500 м), преимущественно кварцито-песчаники с прослоями сланцев.

Коробковская свита, средней мощностью 600 м является продуктивной, представлена практически полностью железистыми кварцитами (двумя железорудными подсвитами, разделенными сланцевыми подсвитами).

По породам докембрия развита кора выветривания, в вертикальном строении которой выделяются три зоны (снизу вверх): дезинтеграции, литомаржа, дисперсная. Мощность коры выветривания в зависимости от состава субстрата варьирует от 5 до 50 м.

Сложноскладчатый рудно-кристаллический фундамент разбит крупными тектоническими нарушениями различного порядка. Западный региональный разлом и тектонические нарушения I и II порядков (протяженностью от 1000 до нескольких сотен метров) создают блоковое строение массива. Зоны тектонических нарушений представляют собой зоны дробления, рассланцевания с глинкой трения. Расстояния между зонами нарушений колеблется от 30 до 150 м. По степени структурной нарушенности массив характеризуется как крупно—среднеблочный, в коре выветривания — как мелкоблочный [4].

Основными параметрами, используемыми при проектировании карьеров (выборе заложения откосов) являются: плотность, прочность, коэффициент разрабатываемости пород.

Таблица 2

Физико-механические свойства рыхлых пород, слагающих борта карьера [4, 5, 9, 15]

Геологический индекс, порода	Мощность, м	Физико-механические свойства пород				
		Плотность, г/см^3	Влажность, %	Коэффициент пористости, %	Сцепление, МПа	φ,°
Q, суглинки	25	1,83	19	0,8	0,05—0,08	19—36
K_2t-cn, мергель, мел	28—35	1,81—1,86	16—41	0,78	0,07—0,14	
K_{1-2} al-s, пески	4—6	1,70—1,86	5—17		0,02	28—33
J Глины песчаные	2—30	2,12	20—22	0,66	0,03—0,07	20—28
***eL*(PR)**, кора выветривания	5—50					
зона литомаржа		2,13—3,31			0,09	22
зона дробления		2,35			0,73—15,1	
Скальные породы						
Породы	Трещиноватость	Плотность, г/см^3	φ,°	*C*, МПа, *H* 10 м	*C*, МПа, *H* 15 м	*C*, МПа, *H* 45 м
Кварциты железистые окисленные	сильная	3,31	14	25,7	25,1	22,2
PRkr$_1$, кварциты магнетитовые и силикатомагнетитовые	сильная	3,48	16	26,7	25,6	23,1
	средняя	3,64	19	28,4	27,7	21,6
PRkr$_2$, сланцы биотитовые, выветрелые	сильная	2,67	15	14,1	13,4	11,6
PRkr$_3$, кварциты магнетитовые с железной слюдкой	сильная	3,51	17	28,8	26,8	23,4
	средняя	3,67	19	29,6	28,3	23,1
PRst$_1$ кварцито-песчаники	сильная	2,57	16	12,7	12,1	10,8
	средняя	2,63	19	14,3	13,7	11,9

Примечание. *H* — высота уступа борта карьера; *C* — сцепление.

Таблица 3

Характеристика деформаций, развивающаяся в прибортовых массивах горных пород [4]

Вид деформации	Величина деформации, МПа	Признаки деформации	Характер деформации	Смещение поверхности прибортового массива, м
Упругая	$<1 \cdot 10^{-3}$		Затухающий	>1,30
Упруго-пластичная	$(2—10) \cdot 10^{-3}$	Микро- и макротрещины	Затухающий	0,20—0,30
Пластичная	$(10—30) \cdot 10^{-3}$	Видимые заколы и трещины	Преимущественно затухающий	1,5—2,0
Ползучесть	$>30 \cdot 10^{-3}$	Разрушение прибортового массива	Прогрессирующий	> 2,0

Таблица 4

Причины и условия развития инженерно-геологических процессов в ходе функционирования ПТС «Железорудные месторождения КМА» (на примере Стойленского и Лебединского карьеров)

Процесс	Условия	Причины	Последствия
ЛОКАЛЬНАЯ ПТС «КАРЬЕР»			
Осыпание	Грунты: связные и несвязные; скальные трещиноватые; угол откоса больше угла внутреннего трения пород.	Выветривание пород. Взрывные работы в карьере	Развивается в течение длительного периода времени. Приводит к выполаживанию откосов, частичному перекрытию нижних площадок уступов
Обрушения	Контакты пород поверхностей ослабления, дизъюнктивных нарушений, зон трещиноватости, падающие в сторону карьера.	Углы падения: поверхностей ослабления 25—30°, трещиноватости 35—40°	Представляют наибольшую опасность для технических средств и персонала. Приводят к выполаживанию откосов, полному или частичному перекрытию нижних площадок уступов
Оползни	Песчано-глинистые породы: низкие прочностные свойства пластичных глинистых слоев в прибортовой части массива, угол падения слоев больше угла внутреннего трения. Скальные породы: наличие глинки трения, заполняющей дизъюнктивные нарушения, падающие в сторону карьера	Изменения напряженного состояния горных пород, не зарегулированность поверхностных и подземных вод, снижение прочностных свойств за счёт увлажнения	Оползни происходят при результирующих углах наклона бортов положе 25−35°. Нарушение технологического ритма, разрушение транспортных коммуникаций (завалы)
Выпирание	Невскрытый слой пластичных глин.	Изменения напряженного состояния горных пород.	Пластические деформации в подошве борта карьера.
ЛОКАЛЬНАЯ ПТС «ОТВАЛ»			
Оползень	Неоднородность гранулометрического состава и низкая прочность пород отвального массива.	Увлажнение пород атмосферными водами. Завышенные параметры откоса отвала	Оползни происходят при результирующих углах наклона бортов положе 10—15°. Уменьшение удельной ёмкости отвала, выход отвала за пределы земельного отвода.
Просадка	Техногенные грунты отвалов, с нарушенной структурой и неоднородным составом (песчано-глинистые и скальные).	Большая высота яруса отвала, создание подземных горных выработок, изменение напряжённо-деформированного состояния глубинной части массива, подстилающего отвал, уплотнение отвальных масс под действием собственного веса.	Дополнительные пригрузки на борт карьера. Создание условий для развития оползней и обрушений
ЛОКАЛЬНЫЕ ПТС «КАРЬЕР», «ОТВАЛ»			
Поверхностная эрозия	Прибортовой массив песчано-глинистого состава	Атмосферные осадки и подземные воды, вытекающие на откос.	Разрушение и подтопление откоса уступов
Фильтрационные деформации	Песчано-глинистые отложения, слагающие борт карьера; подземные воды с техногенным гидродинамическим режимом	Градиент изменения уровня подземных вод в результате работ дренажной системы	Разрушение откоса фильтрационным потоком; подтопление откоса уступов и их частичное разрушение, перекрытие уступов деформированными массами
Суффозия: механическая химическая	Приоткосный массив: сложен обводненными песками. Содержит растворимые породы	Гидростатическое и гидродинамическое давление. Выщелачивание и растворение фильтрационным потоком	Создание условий для развития других процессов

Разработка месторождений полезных ископаемых кардинально изменяет напряжённое состояние горного массива пород (табл. 2). В прибортовых массивах участки пород с измененным напряжённым состоянием захватывают широкие зоны, являясь областями потенциальных поверхностных разрушений [14, 18].

Борта карьера на *конечных контурах* формируются в толще пород осадочного чехла и массива пород рудно-кристаллического фундамента. С точки зрения строения локальной ПТС «Карьер» следует выделить два инженерно-геологических комплекса: верхний, сложенный рыхлыми и полускальными грунтами, мощностью до 50 м, нижний, представленный скальными породами, мощностью до 600 м, каждый из которых характеризуется собственным набором процессов, проявляющихся в бортах карьеров. Развитие гравитационных процессов в высокопрочных скальных грунтах (плотность 3,6 г/см^3, временное сопротивление сжатию 15—30, максимальное 120 МПа) обусловлено наличием складчатости и блочностью массива пород, создаваемой разрывными нарушениями с глинкой трения, зонами дробления и рассланцевания. Борта верхних горизонтов, являясь зонами изменённого напряженно-деформационного состояния (табл. 3), находятся в состоянии временного равновесия, нарушаемого фильтрационными процессами, выветриванием и сейсмическим воздействием массовых взрывов.

Интенсивное выветривание пород, слагающих борта карьеров, провоцирует проявление гравитационных процессов, главным образом осыпей, что приводит к сдваиванию ступеней и изменению конфигурации бортов карьера [18]. В табл. 4 приведены причины и условия развития процессов на территории ПТС «Стойленского и Лебединского карьеров».

Обеспечение безопасности ведения работ требует мониторинга за состоянием приоткосных массивов. Система мониторинг должна включать следующие виды работ, последовательность выполнения которых определяется спецификой решаемых задач.

1. Инженерно-геологическое обследование состояния откосов, мест проявления инженерно-геологических процессов техногенного характера.

2. Опробование горных пород для лабораторных исследований с целью оценки снижения прочности горных пород под влиянием процесса выветривания, повсеместно развивающегося при вскрытии массива.

3. Инженерно-геологическая типизация бортов карьера с учётом литолого-петрографического состава, условий залегания пород, их трещиноватости, блочности и физико-механических свойств, гидрогеологических условий. Выделены пять типов участков с простыми, сложными и очень сложными инженерно-геологическими условиями разработки. Наиболее сложные условия разработки на северо-восточном и восточном бортах карьера. Западный и южный борта относительно благоприятны в инженерно-геологическом отношении.

4. Обоснование местоположения наблюдательных профилей и число реперов с учётом выделенных инженерно-геологических элементом.

5. Маркшейдерские инструментальные измерения по реперам, позволяющие определить показатели, характеризующие процессы деформирования прибортовых прибортовых (приоткосных) массивов: горизонтальные (ξ), и ветикальные (η) смещения, м; полный вектор (b) смещения, м; горизонтальные деформации за период между двумя измерениями и за весь период наблюдений.

6. Сравнительный анализ расчётных и натурных данных, характеризующих устойчивость бортов карьера и обоснование оптимальных их углов заложения.

7. Полученные прогнозные оценки устойчивости бортов карьера могут быть использованы при проектировании и разработке месторождений со сходными инженерно-геологическими условиями.

Месторождения полезных ископаемых вызывает кардинальные изменения окружающей среды: атмо-, лито-, гидро- и биосферы. Анализ закономерности изменчивости загрязнения ландшафта в зоне функционирования хвостохранилища свидетельствует о ежегодном возрастании валового содержания железа в радиусе 10 км от источника загрязнения. Соединения железа, азота и нефтепродуктов являются основными загрязняющими компонентами поверхностных и подземных вод. Пылевое облако радиусом 40 км висит в воздухе над Лебединским и Стойленским карьерами; основная масса пыли осаждается в пределах 3—4 км от места взрыва, что за год составляет до 1000 кг/га.

Негативное воздействие испытывает заповедник Белогорье, участок «Ямская степь», расположенные в непосредственной близости от хвостохранилища Лебединского месторождения. На территории заповедника Белогорье по данным режимных наблюдений фиксируется подтопление территории до 2 м, динамика которого носит сложный характер, что потребовало применение управляющих решений [11]. Меры по предупреждению загрязнения участка Ямская степь и заповедника Белогорье: перехват и организованное отведение поверхностных и фильтрационных вод в оборотную систему; поддержание уровня воды в пруду-отстойнике (балка Сура) в пределах 162,5 м, исключающие подтопление территории заповедника.

Заключение

При длительной разработке месторождений КМА открытым способом происходят кардиналь-

ные изменения компонентов природной среды. Ежегодно возрастает содержание вредных компонентов в почвах, грунтах поверхностных водах. Функционирование хвостохранилища является причиной ежегодного роста валового содержания железа в радиусе 10 км. Основными загрязняющими компонентами поверхностных и подземных вод служат соединения железа, азота и нефтепродуктов, превышающие ПДК.

Техногенный режим подземных вод характеризуется определёнными новыми закономерностями. На территории ПТС «Стойленского и Лебединского карьеров» чётко прослеживается тренд снижения уровня подземных вод в районе депрессионной воронки. В районе Стойленского хвостохранилища продолжает сохраняться купол растекания высотой 3 м.

Оценки состояния ПТС в ходе эксплуатации месторождения и результаты математической обработки данных наблюдений позволили оптимизировать систему мониторинга (сократить число наблюдений за уровнем подземных вод, не снижая качества информации).

Лебединское и Стойлинское месторождения по инженерно-геологическим условиям относятся к сложным. Рыхлые отложения мезозоя и кайнозоя верхнего яруса, характеризующиеся относительно низкими прочностными свойствами, склонностью к пластическим деформациям, провоцируют развитие оползневых процессов.

Интенсивное выветривание пород, слагающих борта карьеров, вызывает проявление главным образом осыпей, что приводит к сдваиванию ступеней и изменению конфигурации бортов карьера. Обследование Стойленского и Лебединского карьеров показывает, что скорость развития процесса техногенного выветривания, активизируемого за счёт буровзрывных работ, увеличивает трещиноватость массива.

Рост сферы взаимодействия ПТС ГОК в ходе длительного функционирования приводит к существенному изменению состояния и свойств окружающей среды, что требует корректировки структуры системы мониторинга. Это позволит выработать более эффективные управляющие решения по снижению негативных воздействий на окружающую среду.

На основании информации, полученной в рамках мониторинга рассматриваемых месторождений, можно составить прогнозы состояния природной среды для перспективных месторождений КМА, в частности, Оскольского рудного района.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 736 с.
2. Бокс Дж, Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1 и 2. М.: Мир, 1974. 197 с.
3. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии. М.: ИД КДУ, 2015. 296 с.
4. Будков В.П. и др. Исследование состояния устойчивости бортов карьера, откосов ярусов отвалов с целью прогноза ожидаемых, допустимых и предельных значений деформаций // Отчет о НИР/ФГУП ВИОГЕМ. Белгород, 2003. 122 с.
5. Гидрогеология СССР. Том IV. Воронежская и смежные области. Геологическое управление центральных районов. М.: Недра, 1971. 499 с.
6. Еланцева Л.А., Акиньшин Л.П. и др. Ведение геоэкологического мониторинга подземных и поверхностных вод в зоне влияния объектов Стойленского ГОКа // Отчет о НИР/НТЦ НОВОТЭК. Белгород, 2015. 154 с.
7. Железные руды КМА /Под ред. В.П. Орлова. М.: Геоинформмарк, 2001. 616 с.
8. Житинская О.М. Обеспечение оптимального функционирования ПТС «Хвостохранилища КМА» на базе прогноза техногенных изменений свойств компонентов системы (на примере Лебединского месторождения) // Труды XI Междун. науч.-практ. конф. «Новые идеи в науках о Земле». Т. 2. М., 2015. С. 292–294.
9. Житинская О.М., Ярг Л.А. Изменение компонентов природной среды при длительной разработке месторождений открытым способом (на примере КМА) // Труды XII Междун. науч.-практ. конф. «Новые идеи в науках о Земле» Т. 2. М., 2017. С. 181–182.
10. Забусов Н.И., Ряжских М.В., Еримица В.Г. и др. Подсчёт запасов подземных вод Лебединского месторождения: Отчет о НИР/ФГУП ВИОГЕМ. Белгород, 2005. 342 с.
11. Карачевцев Н.Ф.. Экспертная оценка влияния хвостохранилища Лебединского ГОКа с учётом его развития на подземные воды, рекомендации по защите прилегающих территорий от подтопления и водных ресурсов от загрязнения: Отчёт о НИР/ НТЦ «НОВОТЭК» Белгород, 2000. 66 с.
12. Кендала М., Стьюарт Л. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 756 с.
13. Крайнов С.Р., Швец В.М. Основы геохимии подземных вод. М.: Недра, 1980. 286 с.
14. Кузькин В.И., Ярг Л.А., Кочетков М.В. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: РИЦ ВИМС, 2003. 153 с.
15. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Л.: Недра, 1986. 272 с.
16. Осипенко Е.А. Экологическое состояние природных ресурсов в зоне функционирования хвостохранилища Михайловсого ГОКа КМА. Канд. дис ... геол.-мин. наук. Курск, 2008. 156 с.
17. Рошаль А.А., Штенгелов А.Р. и др. Создание гидрогеологической информационно-компьютерной системы для управления недрами на территории КМА Белгородской области // Отчёт о НИР/ АОЗТ СП «Геолинк». М., 2001. 173 с.
18. Ярг Л.А. Инженерно-геологическое изучение процесса выветривания. М.: Недра, 1987. 237 с.