—— МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ **—**—

УДК 622.7.017

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ ЯКОВЛЕВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА

© 2024 г. П. А. Рыбников^{1,*}, Л. С. Рыбникова^{1,**}

¹Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, ул. Мамина-Сибиряка 58, Екатеринбург, 620075 Россия *E-mail: ribnikoff@yandex.ru **E-mail: luserib@mail.ru Поступила в редакцию 12.05.2024 г. После доработки 09.08.2024 г. Принята к публикации 29.09.2024 г.

Уникальное по запасам Яковлевское железорудное месторождение Курской магнитной аномалии приурочено к полосе длиной 40 км, шириной в среднем 440 м, мощность рудных пластов варьирует от 50 до 465 м. Богатые железные руды приурочены к кристаллическому фундаменту и залегают на глубине 470-550 м с углом падения 60°-70°. Промышленная добыча начата в 2005 г. Яковлевским подземным рудником системой с закладкой выработанного пространства. Отработка ведется в очень сложных гидрогеологических условиях: в кровле продуктивного горизонта находится высоко напорная многопластовая система Днепровско-Донецкого артезианского бассейна. Непосредственно на породах фундамента залегает нижнекаменноугольный водоносный горизонт (в естественных условиях с напором до 440 м), надежный выдержанный водоупор отсутствует: разделяющая слабопроницаемая толща представлена глинистыми отложениями (мощностью от 0.2 до 30 м) и плотными карбонатизированными образованиями в кровле руднокристаллической толщи (мощностью от 0 до 60 м). Осушение разрабатываемого участка месторождения осуществляется подземным способом путем дренирования только рудного тела с использованием горизонтальных и наклонно-восстающих скважин. Отработка месторождения уже привела к существенному снижению уровней подземных вод, изменению фильтрационных параметров разделяющей защитной толщи. Возможность расширения фронта добычных работ как по площади, так и по глубине требует серьезного гидрогеологического обоснования. Дальнейшее освоение Яковлевского месторождения может осуществляться путем увеличения глубины отработки (до горизонта -525 м) или выемкой предохранительного целика в интервале от -300 до -370 м. Реализация этих вариантов потребует предварительного осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта, расход такого водопонижения составит около 3 тыс $m^{3}/4$, и приведет к формированию общирной депрессионной воронки.

Ключевые слова: гидрогеологические условия, водоотлив, фильтрационная неоднородность, планово-пространственная модель, напорные воды, каменноугольный водоносный горизонт, богатые железные руды, водозащитная толща, зоны водопроводящих трещин, изменение фильтрационных свойств

DOI: 10.31857/S0869780924060054 EDN: ALVZNW

ВВЕДЕНИЕ

Яковлевское месторождение богатых железных руд Курской магнитной аномалии открыто в 1953 г. при проведении поисковых работ по оценке угленосности нижне-каменноугольных отложений (рис. 1) [4, 5]. По запасам руд (9 млрд т руды с содержанием железа до 68%) и их качеству месторождение является уникальным среди открытых и эксплуатируемых в настоящее время железорудных месторождений всего мира, а по своим гидрогеологическим и горнотехническим условиям разработки — одним из наиболее сложных [32].

Вскрытие Яковлевского месторождения осуществлено в 1980 г. тремя стволами в лежачем боку

залежи вне зоны сдвижения на расстоянии 1.1 км от рудного тела. Для проходки стволов был применен способ искусственного замораживания пород, формирование ледопородных цилиндров осуществлялось с помощью 66 скважин глубиной 620 м [28]. Первая руда была поднята в 1997 г., промышленная добыча началась в 2005 г. (см. рис. 1). Реализация проекта первой очереди позволила достичь производственной мощности в 1 млн т/год.

Кроме выработок, пройденных с поверхности, шахтное поле вскрыто горными выработками вентиляционно-закладочного (—370 м) и откаточного горизонтов (—425 м). Способ отработки рудного тела подземный [26].



Рис. 1. Основные этапы развития горнодобывающих и научно-исследовательских работ на Яковлевском месторождении.

В 1986 г. Институтом "ВИОГЕМ" был разработан проект осушения 1-й очереди Яковлевского рудника, в котором для обеспечения безопасной добычи предусматривалось предварительное снижение напоров в нижнекаменноугольном водоносном горизонте дренажной системой из 30 скважин, пробуренных с поверхности. Предполагалось, что при водоотборе 2500 м³/ч произойдет снижение уровня до отметки –230 м, т.е. полного осушения нижнекаменноугольного горизонта не произойдет. Осушение его и собственно рудной залежи должно было осуществляться восстающими скважинами, закладываемыми в виде дренажных узлов из горных выработок горизонта –425 м.

В 1988—1992 гг. на месторождении проводились масштабные опытные работы (опытное и опытно-производственное понижение), 10.02.1992 г. были отключены скважины, дренирующие нижнекаменноугольный водоносный горизонт. На основании интерпретации результатов опытных работ был сделан вывод о низкой проницаемости пород разделяющего слоя между нижнекаменноугольным и рудным водоносным горизонтом. Это позволило обосновать решение об отключении поверхностной системы водопонижения. Возможность безопасной отработки Яковлевского железорудного месторождения под неосушенным нижнекаменноугольным водоносным горизонтом рассматривается во многих работах [3, 7, 24, 31].

В настоящее время осушение разрабатываемого участка месторождения осуществляется подземным способом путем дренирования только рудного тела. Дренажные узлы включают в себя горизонтальные и наклонно-восстающие скважины. Осушение высоконапорных водоносных горизонтов (с напором до 440 м), расположенных над рудной залежью, не осуществляется. Длина шахтного поля 1.6 км, выемочный этаж ограничен условно отметками кровли –370 м, подошвы –425 м. Породы в интервале от –300 до –370 м являются предохранительным целиком.

Для предотвращения образования зоны водопроводящих трещин, связывающих выработки рудника с нижнекаменноугольным водоносным горизонтом, отработка запасов месторождения ведется системой с полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Предполагается, что при таком способе добычи не будут образовываться зона беспорядочного обрушения, разломы и крупные трещины. Деформация массива будет происходить без разрыва сплошности пород с формированием зоны плавных сдвижений [7, 29].

Высота зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством на пластовых месторождениях зависит от мощности вынутого пласта, в данном случае от неполной закладки выработанного пространства. По результатам натурных наблюдений зафиксировано оседание подошвы предохранительного целика на 2 м, на поверхности земли сформировалась мульда глубиной 1.1 м [9].

Проблемы отработки Яковлевского месторождения обсуждаются во многих публикациях [10–13, 17–20, 22, 23, 33, 35]. Журнал "Записки горного института" в 2006 г. (том 168) посвящен особенностям освоения Яковлевского месторождения, в нем было опубликовано 23 научных статьи, посвященных широкому спектру задач, возникающих при отработке месторождения. Стратегия развития Яковлевского горно-обогатительного комбината (ПАО "Северсталь") предусматривает увеличение объемов добычи руды до 5 млн т/год [32].

Целями настоящей работы являются гидрогеологическое обоснование возможности безопасной отработки месторождения при расширении фронта добычных работ как по площади, так и по глубине; прогноз изменения балансовых составляющих, формирующих притоки подземных вод в сложной гидродинамической системе взаимодействующих высоконапорных и водообильных горизонтов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Яковлевское месторождение расположено в Белгородской обл. в 40 км к северо-западу от г. Белгород. В геоморфологическом отношении месторождение относится к южному склону Средне-Русской возвышенности. По рельефу это возвышенная равнина, понижающаяся на ЮЗ к осевой части Днепровско-Донецкой впадины, расчлененная речной и овражно-балочной сетью. В центральной части участка протекает р. Ворскла (левый приток Днепра), отметки дневной поверхности водораздельных участков изменяются от 220 до 250 м, в долине Ворсклы понижаются до 180 м [27].

Климат района умеренно-континентальный. Среднее многолетнее количество атмосферных осадков составляет 585—615 мм, из которых порядка 470—530 мм расходуется на испарение. Высота снежного покрова не превышает 20—30 см. Среднемноголетняя глубина промерзания почвы составляет 60—70 см, максимальная величина промерзания 100 см.

Рассматриваемая площадь входит в состав Украинской синеклизы, северное крыло которой наложено на сводовую часть Воронежской антеклизы. Согласно схеме гидрогеологического районирования, район находится в пределах Днепровско-Донецкого артезианского бассейна (структура II порядка), который входит в состав Восточно-Европейского сложного артезианского бассейна (структура I порядка) [30]. Породы палеозоя имеют здесь достаточно крутое и глубокое залегание (рис. 2).

Месторождение представляет собой синклинальную складку протяженностью 70 км и шириной от 0.8–2.0 км в северной части месторождения до 4.5 км на южном фланге. К западному крылу складки приурочена Яковлевская полоса железистых кварцитов. Падение пород, слагающих месторождение, северо-восточное, угол падения 60°–70°, СЗ простирание при азимуте 320°.



Рис. 2. Гидрогеологический разрез Днепровско-Донецкого артезианского бассейна [31]. 1 – суглинки; 2 – переслаивание песков и глин; 3 – мел; 4 – мергель; 5 – глины; 6 – песчаные глины; 8 – песчаники; 9 – известняки; 10 руды; 11 – кварциты; 12 – кристаллические сланцы; 13 – граниты; 14 – пьезометрический уровень водоносных горизонтов.

Месторождение приурочено к породам кристаллического фундамента, перекрытого толщей осадочных пород мощностью 550-600 м (рис. 3). Богатые железные руды (БЖР) являются корой выветривания железистых кварцитов, они образуют непрерывные плащеобразные залежи изменчивой формы шириной от 200 до 600 м. Вертикальная мощность изменяется от 20 м у лежачего бока до 400 м у висячего бока рудной залежи. Основные рудные минералы месторождения: мартит, железная слюдка, гематит, гидрогематит и сидерит; нерудные минералы представлены кварцем, хлоритом, кальцитом.

Главная особенность геологического строения Яковлевского месторождения — сложные гидрогеологические условия, характеризующиеся наличием в разрезе девяти водоносных горизонтов. Они разделены на два слабо связанных водоносных комплекса региональным водоупором, толщей киммеридж-оксфордских глин мощностью 35–65 м. Верхний комплекс объединяет аллювиальный, харьковский, каневско-бучакский, турон-маастрихтский, альб-сеноманский, неоком-аптский горизонты. Нижний комплекс состоит из юрского (келловейского), каменноугольного и руднокристаллического горизонтов.

Водоносные горизонты верхней части осадочной толщи характеризуются безнапорным или слабонапорным режимом, сезонными колебаниями уровней подземных вод. В породах нижней части осадочной толщи распространена система напорных водоносных горизонтов с напорами до 480 м в каменноугольном водоносном горизонте. Непосредственное питание атмосферными осадками на площади района имеют водоносные горизонты, залегающие выше сантон-кампанского водоупора. Область питания остальных водоносных горизонтов находится севернее Белгородского железорудного района, в сводовой части Воронежской антеклизы.

Юрский (келловейский) водоносный горизонт (J_2k) приурочен к толще песков мощностью 25–55 м с прослоями песчаников, реже глин. Коэффициент фильтрации варьирует в пределах 0.3–2.2 м/сут. Водопроводимость пород изменяется от 10 до 40 м²/сут, коэффициент пьезопроводности составляет (1.5–3.2)·10⁵ м²/сут. От нижележащего нижнекаменноугольного водоносного горизонта он отделен пластом водоупорных бат-байосских глин мощностью 30–50 м. На отдельных участках мощность глин уменьшается до 10 м, где осуществляется гидравлическая связь келловейского водоносного горизонта с каменноугольным.

Нижнекаменноугольный водоносный горизонт (C₁) развит повсеместно и приурочен к толще известняков, переслаивающихся, особенно в нижней части толщи, с углистыми глинами. Мощность водоносного горизонта составляет 20–80 м. Коэффициент фильтрации изменяется в широком диапазоне от 0.01 до 12.5 м/сут, причем наиболее низкие значения отмечаются над сланцами лежачего бока (на юго-запад от рудной полосы). Коэффициент пьезопроводности изменяется от $1\cdot10^4$ до $5\cdot10^5$ м²/сут. Горизонт высоконапорный, в естественных условиях напоры над кровлей известняков достигали 380-480 м, пьезометрические уровни воды устанавливались на абсолютных отметках 146-148 м.

Руднокристаллический водоносный горизонт (AR-PR) приурочен к рудам, железистым кварцитам, сланцам лежачего и висячего боков. Условия фильтрации подземных вод определяются степенью трещиноватости и тектонической нарушенности пород. Наиболее проницаемыми являются рыхлые разности богатых железных руд $(k = 0.04 \div 0.28 \text{ м/сут});$ сланцы и кварциты характеризуются слабой водообильностью (k ~ 0.01 м/сут). Водопроводимость руднокристаллического горизонта изменяется от 2 (сланцы, граниты) до 50 м²/сут (богатые руды). Водоносный горизонт напорный. В естественных условиях напоры над кровлей водоносного горизонта достигали 405–510 м, пьезометрические уровни воды устанавливались на абсолютных отметках 149-151 м.

Формирование водопритоков в подземные горные выработки Яковлевского рудника определяется обводненностью руднокристаллического водоносного горизонта и вышележащего нижнекаменноугольнго водоносного горизонта. Нижнекаменноугольный водоносный горизонт гидравлически связан с руднокристаллическим через толщу глинистых отложений в подошве нижнекаменноугольного горизонта (мощностью от 0.2 до 30 м) и плотных переотложенных руд, карбонатизированных бокситовых образований в кровле руднокристаллической толщи (мощностью от 0 до 60 м).

Под влиянием осушительных мероприятий на Яковлевском месторождении в нижнекаменноугольном и руднокристаллическом водоносных горизонтах сформировались обширные воронки депрессии с радиусом влияния в десятки километров. Уровень нижнекаменноугольного водоносного горизонта в центре депрессионной воронки расположен на абсолютных отметках 29÷50 м. Режим фильтрации в руднокристаллическом водоносном горизонте следует считать напорным, поскольку пьезометрические уровни горизонта (-350 м), зафиксированные по скважинам, минимум на 20 м превышают отметки потолочины (-370 м).

Среднегодовой суммарный водоприток к водоотливному комплексу за последние годы составил 505 м³/ч, варьируя от 451 до 542 м³/ч.



Рис. 3. Геологический разрез по линии 29 [9]. *a, b, c, d* – контур отработки между горизонтом -370 м и горизонтом -425 м; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 – контуры богатых железных руд.

МЕТОДИКА РАБОТ

Гидродинамическая модель Яковлевского месторождения базируется на результатах работ, выполненных ООО НТЦ "НОВОТЭК" в предыдущие годы [2]. Авторами представленной работы было увеличено количество пластов модели, введена равномерная разбивка, уточнены геофильтрационные параметры, изменена глубина заложения дрен и их положение, прогнозные задачи решались в нестационарной постановке [36].

Геофильтрационная модель представляет собой 5-пластовую планово-пространственную модель фильтрации подземных вод. Рассматриваются следующие водоносные горизонты, взаимосвязанные через слабопроницаемые разделяющие слои: келловейский, нижнекаменноугольный, руднокристаллический (рис. 4). Предполагается, что в пределах целика ($m_0 = 65$ м) возможно формирование зоны водопроводящих трещин.

Фильтрационный поток моделировался равномерной прямоугольной сеткой с шагом 50 м, состоящей из $390 \times 390 = 152100$ блоков, каждый из которых включает 5 слоев. Площадь модели составила 400 км².

Северная граница распространения нижнекаменноугольных отложений проходит по югозападному склону Воронежского массива примерно в 30–50 км от месторождения. Здесь начинает формироваться региональный поток, который реализуется на модели границей III рода с отметками 144—151 м, что отражает положение уровней в естественных условиях. В Ю, ЮЗ и ЮВ направлениях глубина залегания кровли горизонта увеличивается, в пределах Днепровско-Донецкой впадины до 1000 м и более. Южная граница соответствует области разгрузки регионального потока и реализована на модели границей III рода с отметками 132—136 м через соответствующее фильтрационное сопротивление на расстоянии ($\Delta L \sim 50$ км), которое позволяет учитывать расширение области фильтрации в процессе осушения водоносных горизонтов. Дополнительное фильтрационное сопротивление Φ_{π} определялось по формуле [2]:

$$\Phi_{\pi} = \Delta L/BT$$
,

где ΔL — расстояние, на которое "удалена" граница области фильтрации, т.е. расстояние от границы области фильтрации до контура с известным напором (уровнем); *В* — средняя ширина ленты тока в пределах реализуемого участка "дополнительной" области фильтрации; *T* — средняя водопроводимость пласта в пределах реализуемого участка. Кондактанс С (м²/сут на 1 м) определялся по зависимости [2] С = $1/\Phi_{\rm n}B$ и составил 0.001 и 0.5 м²/сут на 1 м для северной и южной границы соответственно.

Граничные условия для руднокристаллического горизонта задавались по такой же схеме с отметками уровней 148—155 м на северной границе и 115— 127 м на южной при значениях $C = 0.01 \text{ м}^2$ /сут на 1 м.



Рис. 4. Геофильтрационная схема участка отработки Яковлевского месторождения.

Горные выработки реализованы на модели посредством задания граничного условия III рода (дрена) с заданием уровня подземных вод, отвечающего отметке дрены, через дополнительное фильтрационное сопротивление, учитывающее замену горных выработок расчетным блоком. Величина кондактанса подбиралась при решении обратных задач при фиксированном положении отметки дна дрены, которое соответствует глубине отработки. Дренажные скважины задавались с помощью граничного условия II рода.

Параметры руднокристаллического горизонта, разделяющей слабопроницаемой толщи, а также параметры нижнекаменноугольного водоносного горизонта первоначально были приняты по результатам калибрации геофильтрационной модели при решении эпигнозных задач [2]. Коэффициент фильтрации нижнекаменноугольного водоносного горизонта изменяется от 0.15 до 10 м/сут. Наиболее проницаемыми являются известняки над железорудной полосой (k = 10 м/сут); на северо-востоке (висячий блок) $k = 0.25 \div 5$ м/сут, на юго-западе (лежачий блок) $k = 0.1 \div 1.5$ м/сут. Коэффициент фильтрации пород железорудной полосы составляет 0.1 м/сут, сланцев k = $0.0008 \div 0.0025$ м/сут. Фоновые значения коэффициентов фильтрации слабопроницаемого слоя составляют (1÷7)·10⁻⁶ м/сут, над отработанной частью железорудной полосы по результатам калибрации модели в 2018 г. [2] значения коэффициента фильтрации были увеличены на 2 порядка до 2.5·10⁻⁴ м/сут.

По проницаемости слои моделировались кусочно-однородными. Мощность водоносных горизонтов и разделяющих толщ в каждом блоке рассчитывалась как разность между абсолютными отметками кровли и подошвы соответствующего пласта. Проводимость пласта в каждом расчетном блоке модели определялась исходя из распределения "полей" гидрогеологических параметров.

В основу решения обратной стационарной задачи положены современные фактические данные о напорах (уровнях) подземных вод нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов, водопритоках к дренажным устройствам и горным выработкам рудника. В процессе калибрации модели при решении обратной задачи уточнялись фильтрационные характеристики пластов в плане и разрезе. Было установлено, что коэффициент фильтрации разделяющей толщи над отработанным горизонтом увеличился до 9·10⁻⁴ м/сут (почти в 4 раза по сравнению с полученными на предыдущем этапе в работе [2]).

Соответствие модельных и фактических уровней нижнекаменноугольного горизонта имеет удовлетворительный характер, средневзвешенная ошибка составляет 1%; модельное значение водопритока к системе осушения отличается от фактического на 6%.

В настоящее время водоотлив рудника (горизонт –425 м) формируется за счет притока из руднокристаллического водоносного горизонта и перетока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в руднокристаллический через слабопроницаемые породы, залегающие в кровле руднокристаллической водоносной толщи.

С использованием откорректированной гидрогеологической модели проведено прогнозное численное моделирование для трех вариантов развития рудника:

1. Отработка горизонта богатых железных руд в интервале –370 ÷ –425 м в восточном и западном направлении на расстояние до 2.4 км.

2. Отработка горизонта богатых железных руд в интервале -425 ÷ -525 м.

3. Отработка целика выше горизонта -370 м в интервале $-325 \div -370$ м, непосредственно под нижнекаменноугольным водоносным горизонтом.

Безопасная отработка центрального участка Яковлевского месторождения при расширении границ выемки до горизонта –525 м (вариант № 2) и отработка запасов предохранительного целика (вариант № 3) возможны только при проведении предварительного осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта. Геомеханическими расчетами установлено, что при текущем уровне недозакладки выработанного пространства, после углубления отработки до горизонта –525 м (вариант № 2), защитный целик будет в значительной степени разрушен, и может сформироваться зона водопроводящих каналов [16]. Такой сценарий предопределяет необходимость полного осушения нижнекаменноугольного горизонта.

В качестве исходного принималось положение уровней подземных вод, которое соответствует фактическому современному и реализовано на модели в процессе решения обратной задачи (рис. 5а).

Геофильтрационные параметры в руднокристаллическом водоносном горизонте на весь прогнозный период для участков отработки слоевой системой с полной закладкой (песчано-цементная смесь) выработанного пространства литой твердеющей смесью задавались без изменений. Опыт отработки месторождения показывает, что в процессе закладочных работ наблюдается недозаклад, достигающий десятки сантиметров, отмечается трещиноватость закладочного массива, при этом существенных изменений в водопритоках на участках заложенного и неотработанного массивов в настоящее время не отмечается.

При реализации сценария отработки по варианту № 1 над восточным участком было задано повышенное значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи (9·10⁻⁴ м/сут), которое характеризует увеличение взаимосвязи



Рис. 5. Распределение уровней подземных вод в нижнекаменноугольном водоносном горизонте (врезка на центральную часть): а – современное состояние; б – вариант № 1 (отработка в интервале –370 ÷ -425 м); в – вариант № 2 (отработка в интервале –425 ÷ –525 м); г – вариант № 3 (отработка целика). 1 – горные выработки, 2 – контур железорудной полосы, 3 – гидроизопьезы.

руднокристаллического и нижнекаменноугольно- увеличение площади осушения и необходимое го горизонтов при отработке.

При реализации сценария отработки по варианту № 1 над восточным участком было задано повышенное значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи (9.10⁻⁴ м/сут), которое характеризует увеличение взаимосвязи руднокристаллического и нижнекаменноугольного горизонтов при отработке.

Задача осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта решалась в нестационарной постановке и была разбита на два этапа. На первом этапе целью было определение максимального водопритока, для чего в соответствующие блоки задавалось граничное условие III рода – дрена, с отметками подошвы нижнекаменноугольного водоносного горизонта. На втором этапе подбирался расход восстающих скважин (граничное условие II рода), обеспечивающий поэтапное

снижение уровня за заданное время.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при развитии горных работ в интерва*ле* −*370* ÷ −*425 м (вариант № 1)*. Увеличение в 3 раза площади ведения горных работ приводит к расширению депрессионной воронки на юго-восток (см. рис. 5б), закономерному росту бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта (до 851 м³/ч) и расходов перетекания из нижнекаменноугольного водоносного горизонта (до 191 м³/ч) (рис. 6). Суммарный водоприток к концу отработки увеличится в 2 раза и составит 1042 м³/ч. На завершающем этапе отработки уровни подземных вод в руднокристаллическом водоносном



Рис. 6. Балансовые составляющие (Q, м³/ч, PR – водоприток из руднокристаллического горизонта; C1 – водоприток из нижнекаменноугольного горизонта с учетом перетекания из келловейского) и уровни подземных вод (абс. отм., м, C1 – нижнекаменноугольный горизонт, J – келловейский горзонт) при реализации сценариев отработки: вариант № 1, отработка в интервале –370 ÷ –425 м; вариант № 2, отработка в интервале –425 ÷ –525 м; вариант № 3, отработка целика.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ № 6 2024

горизонте в центре депрессии снизятся до отметки –425 м; понижение уровня в нижнекаменноугольном горизонте составит 35 м, в келловейском 37 м (см. рис. 6).

Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при развитии горных работ в интерва*ле* −425 ÷ −525 м (вариант № 2). Увеличение глубины отработки приводит к закономерному росту расходов бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта (до 951 м³/ч) с последующим снижением (до 289 м³/ч) в результате осушения нижнекаменноугольного горизонта. Возможность отработки горизонта -525 м определяется эффективностью водопонижения в нижнекаменноугольном водоносном горизонте с полным его осушением над горными выработками, до отметки -300 м (см. рис. 6). Расход водоотлива из нижнекаменноугольного горизонта (с учетом перетекания из келловейского горизонта) в течение 10 лет возрастает от 1240 до 2420 м³/ч с последующей стабилизацией на уровне 2090 м³/ч. Доля перетекания из келловейского горизонта в общем расходе из нижнекаменноугольного горизонта незначительна (10–15%), в абсолютных величинах она увеличивается от 213 до 321 м³/ч. Абсолютные отметки уровней подземных вод в руднокристаллическом водоносном горизонте в центре депрессии составят -525 м. Снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта до отметки -300 м произойдет через 13 лет после начала осушения, при этом снижение уровня в келловейском горизонте прогнозируется величиной около 170 м (см. рис. 6).

Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при отработке запасов рудного целика в интервале — 300 ÷ — 370 м (вариант № 3). Возможность отработки целика выше отметки — 370 м определяется эффективностью водопонижения в нижнекаменноугольном водоносном горизонте с полным его осушением над горными выработками.

Расход водоотлива, обеспечивающий необходимое снижение уровня подземных вод в нижнекаменноугольном водоносном горизонте, возрастает в течение 11 лет от 1163 до 2600 м³/ч с последующей стабилизацией на уровне 2200 м³/ч (см. рис. 6). При заблаговременном начале водопонижения в этом горизонте через 11 лет будет достигнуто необходимое снижение уровня, что обеспечит возможность безопасной отработки целика.

Величина водоотлива из системы скважин, дренирующих нижнекаменноугольный горизонт, практически полностью формируется за счет его ресурсов и перетекания из келловейского горизонта, к концу планируемых работ она составит 325 м³/ч, порядка 12% от общего расхода дренажа. Расход бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта на начальном этапе возрастет до 358 м³/ч, в последующем снизится до 190 м³/ч.

При реализации вариантов № 2 или № 3 обязательным условием является полное осушение нижнекаменноугольного водоносного горизонта (до отметки –300 м) над всей отрабатываемой площадью с понижением уровня на 350 м от существующего в настоящее время (над выработанным пространством) или на 450 м от статического.

В ходе опытно-производственного водопонижения в каменноугольном водоносном горизонте (1959–1961 гг.) в регионе образовалась обширная депрессия, зафиксированная на 65 км по простиранию рудного тела и в 20 км в лежачем боку месторождения. В апреле–августе 1961 г. максимальная производительность опытного понижения (7 скважин) достигала 1280 м³/ч, при этом в центре депрессии понижение составило 210 м (~50% от статического).

При ведении опытного, а затем опытно-производственного водопонижения (1988—1992 гг.) водоотбор из нижнекаменноугольного горизонта осуществлялся 12 водопонижающими скважинами и достиг 900 м³/ч к 01.12.1991 г. Уровни подземных вод были снижены в центре депрессии в каменноугольных известняках на 220—250 м (55% от статического), в руднокристаллическом массиве на 160—180 м.

Исходя из этого, полученные в нашей работе значения водоотлива из нижнекаменноугольного горизонта (2.4–2.6 тыс. м³/ч), обеспечивающие его полное осушение на площади около 50 га (а не только в центре депрессии), являются вполне обоснованными и правдоподобными.

ФАКТОРЫ, ОСЛОЖНЯЮЩИЕ ВЕЛЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

Снижение гидростатических напоров в водоносных горизонтах приводит к снятию эффекта гидростатического взвешивания пород и соответствующему увеличению напряжений в скелете породы. При этом вследствие развития процессов депрессионной консолидации формируется зона деформаций пород и земной поверхности.

Оседания земной поверхности, связанные с добычей подземных флюидов, известны уже почти столетие [39]. Они угрожают крупным городским центрам и дельтовым районам по всему миру, таким как Бангкок, Джакарта, Мехико, Хошимин, где скорость оседания превышает 10 см/год [15, 37, 38].

На Яковлевском руднике в период опытного водопонижения максимальные оседания земной поверхности зафиксированы в районе расположения дренажных скважин, величина оседаний уменьшалась с удалением от рудной залежи вкрест простирания. Скорость оседаний в районе работы дренажной системы составляла порядка 5.0 мм/мес, в остальных районах до 0.6—2.6 мм/мес. Суммарные максимальные зафиксированные оседания составили 250 мм. Наблюдения за оседаниями поверхности после прекращения водоотбора показали, что процесс депрессионного уплотнения носит необратимый характер: восстановление уровней в осушаемых водоносных горизонтах не привел к подъему поверхности [2, 15]. Деформация земной поверхности, в основном, определялась сжатием глинистых пород бат-байосского горизонта.

Важнейший показатель, использующиеся при расчетах водопритоков и проектировании системы осушения рудника, это коэффициент фильтрации слабопроницаемой толщи, разделяющей нижнекаменноугольный и руднокристаллический горизонты. Во временном разрезе его значения за 60 лет увеличились на 3 порядка (рис. 7). Причем этот рост хорошо коррелирует с основными этапами изучения и освоения месторождения: $k_0 = (1-6) \cdot 10^{-6}$ м/сут по результатам опытно-промышленного (1959-1961 гг.), опытного и опытно-производственного водопонижения (1988–1992 гг.); $k_0 = 6 \cdot 10^{-5}$ м/сут после проходки горных выработок (1997 г.); k₀ = 2.5·10⁻⁴ м/сут после начала промышленной добычи (2005 г.). Особенно показательными являются результаты, полученные разными исследователями в последние годы при анализе гидрогеологических условий в процессе развития горнодобывающих работ: за несколько лет значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи увеличилось в 4 раза до $k_0 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м/сут.}$

Причина увеличения проницаемости разделяющей слабопроницаемой толщи —деформационные процессы в предохранительном целике, вызванные неполной закладкой выработанного пространства. По данным многолетних натурных наблюдений на Яковлевском руднике оседание подработанной толщи богатых железных



Рис. 7. Изменение значения коэффициента фильтрации разделяющей толщи, полученного при гидрогеологических расчетах. Организация, проводившая работы: ЦНГ – ЦНИИгоросушение [8]; ВГМ – ВИОГЕМ [25]; НВТ – НТЦ НОВОТЭК [1, 2]; ИГД – ИГД УРО РАН [16].

руд приводит к формированию мульды, которая проявляется в том числе и на поверхности [6, 7, 16, 34]. В центре мульды оседание поверхности земли превысило 1 м (средняя скорость 12 мм/мес). Оседание целика на горизонте —370 м более 2 м, скорость оседаний верхней границы очистных работ составляет 16 мм/мес, что в 1.3 раза выше, чем скорость оседания земной поверхности. Сдвижение земной поверхности по отношению к оседанию верхней границы выработанного пространства запаздывает во времени на несколько лет (временной лаг 10—12 лет).

По результатам обработки натурных наблюдений с использованием глубинных реперов были получены значения оседания, наклонов, кривизны. Аналитическими расчетами определена граничная кривизна, которая соответствует высоте зоны водопроводящих трещин [9, 10]. Ее величина, считая от кровли закладочных выработок (горизонт -370 м), составляет 11 м, т.е. толща, оставляемая как защитная, на 15-18% нарушена техногенными водопроводящими трещинами.

Негативными факторами для возникновения прорывов подземных вод являются вывалообразование и куполение кровли выработок на горизонте —370 м. По данным геодинамичеекого мониторинга, проводимого сотрудниками геолого-маркшейдерского отдела Яковлевского рудника, а также кафедрой горных предприятий и подземных сооружений Горного университета (г. Санкт-Петербург), высота некоторых образовавшихся куполов обрушения достигает 10—15 м [13, 24, 30].

При расширении фронта добычных работ необходимо осуществить полное осушение нижнекаменноугольного водоносного горизонта, для чего потребуется реконструкция системы подземного водоотлива с увеличением его производительности. Вариант осушения этого водоносного горизонта с поверхности будет связан со значительными затратами, которые вызваны необходимостью бурения скважин большой глубины (550 м) и оборудованием каждой из них насосами. Рациональным вариантом осушения было бы строительство подземного дренажного контура с восстающими скважинами, обеспечивающими необходимое снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта. Такие системы осушения успешно эксплуатируются в течение десятков лет на Лебединском и Южно-Лебединском месторождениях КМА, Соколовско-Сарбайской группе железорудных месторождений (Казахстан) [14, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Яковлевское месторождение — сложно-структурное, что определяется особенностями его геологического строения. Оно характеризуется наличием двух этажей: кристаллический фундамент и осадочная толща мощностью более 500 м. Богатые железные руды мощностью до 400 м приурочены к кристаллическому фундаменту и залегают с углом падения 60°–70°, осадочные отложения имеют практически горизонтальное залегание.

Особенности геологического строения приводят к значительной изменчивости глубины залегания кровли и подошвы пластов, их мощностей и как следствие фильтрационных характеристик (в частности, проводимости).

Глубина отработки в настоящее время более 500 м, планируется ее увеличение на 200 м. Над горными выработками находится водонасыщенная система из 9 водоносных горизонтов, из них основной источник обводнения рудника — нижнекаменноугольный горизонт с напорами в естественных условиях до 440 м.

Месторождение отрабатывается системой с закладкой выработанного пространства, однако изза неполной закладки выработанного пространства происходит деформация подошвы защитного целика и его оседание. В результате этих процессов формируется зона водопроводящих трещин. Фиксируется также мульда сдвижения на поверхности земли.

В процессе освоения месторождения произошло изменение фильтрационных свойств массива горных пород в пространстве и во времени, т.е. основных параметров для выполнения достоверного прогноза. За 60 лет значение коэффициента фильтрации разделяющего слоя между руднокристаллическим и нижнекаменноугольным горизонтом увеличились на 3 порядка: от 10⁻⁶ м/сут в ходе опытно-промышленного водопонижения до 10⁻³ м/сут в настоящее время.

Для дальнейшего освоения месторождения потребуется полное осушение нижнекаменноугольного горизонта, тогда суммарный расход водоотлива увеличится в 5 раз, что приведет к необходимости реорганизации системы осушения. Эффективность ее работы может быть обеспечена с помощью строительства подземного дренажного контура с восстающими скважинами, обеспечивающими необходимое снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022—2024 гг.) "Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании" (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Анализ гидрогеомеханических условий шахтного поля Яковлевского месторождения, оценка качества массива горных пород и принятых систем разработки железных руд. Белгород: ООО НТЦ "НОВОТЭК", 2002.

- 2. Гензель Г.Н., Еланцева Л.А., Зайцев Д.А. Создание численной геофильтрационной модели Яковлевского месторождения и прогноз притоков подземных вод в проектируемые горные выработки. Белгород: ООО НТЦ "НОВОТЭК", 2018.
- Гензель Г.Н., Осипенко Ю.С., Еланцева Л.А. Выполнить обоснование безопасных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под неосушенным нижнекарбоновым водоносным комплексом без сооружения водонепроницаемых перемычек. Согласование результатов в Госгортехнадзоре России. Белгород: ООО НТЦ "НОВОТЭК", 2004. 121 с.
- Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). А.Т. Бобрышева (ред.). М.: Недра, 1972. Т. II. 480 с.
- Гидрогеология СССР. Воронежская, Курская, Белгородская, Орловская, Липецкая, Тамбовская области. А.Т. Бобрышева (ред.). М.: Недра, 1972. Т. IV. 498 с.
- 6. Голубничий Д.В., Гилязев Д.Х, Игнатенко И.М., Хаустов В.В. Особенности обеспечения экологической безопасности подземной разработки Яковлевского месторождения богатых железных руд // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2023. № 2. С. 94–103.
- 7. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование мониторинга массива при разработке руд Яковлевского месторождения КМА под неосушенными водоносными горизонтами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S4. С. 27–37.
- Гуркин А.Я. Исследование эффективности дренажных систем в сложных условиях осушения на примере Яковлевского месторождения КМА: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Моск. ин-т радиоэлектроники и горной электромеханики. М.: [б. и.], 1964. 17 с.
- Гусев В.Н., Илюхин Д.А., Журавлев А.Е. Оценка степени нарушенности подрабатываемой толщи техногенными водопроводящими трещинами по данным геомеханического мониторинга в горных выработках Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 74–81.
- Гусев В.Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 638–643.
- Дашко Р.Э. Инженерно-геологическая характеристика и оценка богатых железных руд Яковлевского рудника // Записки Горного института. СПб. 2006. Т. 168. С. 97–104.
- Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Геотехническая и инженерно-геологическая оценка безопасности добычи богатых железных руд на Яковлевском руднике (Курская магнитная аномалия) // Геотехника. 2013. № 5-6. С. 26-38.
- Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 151–160.
- Ефремов Е.Ю., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Обоснование осушения гидрогеодинамической системы "водовмещающие отложения – дезинтегрированный массив" при подземной разработке железорудных месторождений // Успехи современного естествознания. 2023. № 3. С. 47–57.
 Журин С.Н. Управление состоянием массива при
- 15. Журин С.Н. Управление состоянием массива при подземной отработке месторождений руд черных

металлов в сложных гидрогеологических условиях: автореф. дис. ... докт. техн. н. М.: МГГУ, 1998. 45 с.

- 16. Зотеев О.В. Обоснование безопасной отработки центрального участка Яковлевского месторождения при расширении границ выемки до гор. –525 м и существующего горного отвода по флангам. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2020. 206 с.
- Зотеев О.В. Обоснование безопасных и эффективных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под водоносным горизонтом. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2007. 110 с.
- 18. Зотеев О.В., Макаров А.Б., Фаустов С.И. Проблемы отработки Яковлевского железорудного месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 8. С. 4–8.
- Илюхин Д.А. Прогноз развития зоны водопроводящих трещин при разработке Яковлевского месторождения богатых железных руд: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 125 с.
- 20. Котлов С.Н., Целищев Н.А., Сотник Е.А., Гилязев Д.Х. Геолого-гидрогеологические факторы формирования водопритоков в горные выработки Яковлевского рудника рудника // Горный журнал. 2023. № 5. С. 108–113.
- Крамчанинов Н.Н., Петин А.Н., Погорельцев И.А. Анализ состояния подземных вод горнопромышленного района КМА на территории Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 9 (104). С. 166–172.
- № 9 (104). С. 166–172. 22. Петров Д.Н. Формирование напряженно-деформированного состояния горного массива до и после осушения // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 232–239.
- Протосеня А.Г., Петров Д.Н., Синякин К.Г., Мартемьянов Г.А. Натурные наблюдения за осадкой рудной потолочины при ведении горных работ на Яковлевском руднике // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 158–162.
- 24. Протосеня А.Г., Потемкин Д.А. Геомеханическое обоснование параметров водозащитной потолочины и защитного перекрытия при освоении Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2006. № 3. Т. 168. С. 127–136.
- 25. Разработка рекомендаций по совершенствованию системы осушения шахтного поля в процессе строительства Яковлевского рудника / [Кол. авт. Забейда М.А., Зубова А.В., Еланцева Л.А. и др.]. Белгород: ВИ-ОГЕМ, 1990. **321 с.**
- 26. Сергеев С.В., Лябах А.И., Зайцев Д.А. Опыт разработки богатых железных руд Яковлевского месторождения КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 3 (98). С. 200–208.
- 27. Сергеев С.В., Лябах А.И., Квачев В.Н., Севрюков В.В. Геолого-гидрогеологическая характеристика

Яковлевского месторождения // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 9 (104). С. 147–154.

- 28. Сергеев С.В. Формирование горного давления при вскрытии месторождений КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2008. № 3 (43). С. 197–202.
- 29. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. О формировании предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки "Удачная" системами с обрушением // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 322–334.
- 30. Трубицын Д.С., Дешевых Г.Ю. Гидрогеологическое районирование территории южной части ЦФО с уточнением границ структур II, III порядков // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2021. № 2. С. 83–93.
- Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Дашко Р.Э. Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 9–18.
- Трушко В.Л., Трушко О.В. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 569–577.
- 33. Трушко О.В., Стрелецкий А.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива Яковлевского рудника при ведении горных работ под защитным перекрытием // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 60–63.
- 34. Тютюкова В.А., Голубничий Д.В., Гилязев Д.Х. Определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2 (124). С. 69–75.
- Устюгов Д.Л. Постояннодействующая гидродинамическая модель Яковлевского месторождения богатых железных руд (Курская магнитная аномалия) // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 332–335.
- 36. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015. 564 p.
- Gambolati G., Teatini P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection // Water Resour. 2015. N 51. P. 3922–3955.
- Minderhoud P.S.J., Erkens G., Pham V.H., et al. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam // Environ Res Lett. 2017. 12(6):064006. 14 p.
- Pratt W.E., Johnson D.W. Local Subsidence of the Goose Creek Oil Field // Journal of Geology. 1926. V. 34. P. 577–590.

GROUNDWATER FLOW MODELING TO JUSTIFY SAFE MINING OF THE YAKOVLEVSKY IRON ORE DEPOSIT (KMA)

P. A. Rybnikov^{*a*,[#]}, L. S. Rybnikova^{*a*,^{##}}

^aInstitute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg, 620075 Russia [#]E-mail: ribnikoff@yandex.ru ^{##}E-mail: luserib@mail.ru</sup>

РЫБНИКОВ, РЫБНИКОВА

The unique Yakovlevskoe iron ore deposit of the Kursk magnetic anomaly (KMA) is confined to a 40-kmlong strip with an average width of 440 m, and the thickness of ore layers varying from 50 to 465 m. Rich iron ores are confined to the crystalline basement and lie at a depth of 470-550 m with an angle of incidence 60-70°. Industrial mining began in 2005 at the Yakovlevsky underground mine using a system with backfilling of mined-out space. Mining is carried out under very difficult hydrogeological conditions: at the top of the productive horizon there is a high-pressure multi-layer system of the Dnieper-Donets artesian basin. Directly on the foundation rocks lies the Lower Carboniferous aguifer (under natural conditions with a pressure of up to 440 m), there is no reliable sustained aquitard: the separating weakly permeable strata is represented by clay deposits (thickness from 0.2 to 30 m) and dense carbonated formations in the roof of the ore-crystalline strata (thickness from 0.2 to 30 m, up to 60 m). Drainage of the developed area of the deposit is carried out underground by draining only the ore body using horizontal and inclined-rising wells. Development of the deposit has already led to a significant decrease in groundwater levels and a change in the parameters of the separating protective layer. The possibility of expanding the front of mining operations both in area and in depth requires a serious hydrogeological justification. Further development of the Yakovlevsky iron ore deposit can be carried out by increasing the mining depth (to a horizon of -525 m) or by excavating a safety pillar in the range from -300 to -370 m. The implementation of these options will require preliminary drainage of the Lower Carboniferous aquifer, the consumption of such water reduction will be about 4 thousand m³/hour and will lead to the formation of an extensive depression cone.

Keywords: *hydrogeological conditions, pumping, heterogeneity, plan-spatial model, water strikes, aquifer, aquitard, rich iron ores, zones of water-conducting cracks, change in filtration properties*

REFERENCES

- 1. [Analysis of hydrogeomechanical conditions of the mine field of the Yakovlevskoe deposit, assessment of the quality of the rock mass and the adopted iron ore mining systems]. Belgorod, OOO NTC "NOVOTEK",2002. (in Russian)
- Genzel, G.N., Elantseva, L.A., Zaitsev, D.A. [Creation of a numerical geofiltration model of the Yakovlevskoe deposit and forecast of groundwater inflows into the designed mine workings]. Belgorod, OOO NTC "NOVOTEK",2018. (in Russian)
- 3. Genzel, G.N., Osipenko,Yu.S., Elantseva, L.A. [To carry out a substantiation of safe conditions for mining the Yakovlevskoe iron ore deposit under an undrained lower Carboniferous aquifer complex without the construction of waterproof lintels. Coordination of the results with the Gosgortekhnadzor of Russia]. Belgorod, OOO NTC "NOVOTEK", 2004121 p. (in Russian)
- 4. [Geology, hydrogeology and iron ores of the Kursk Magnetic Anomaly basin (KMA)] A.T. Bobrysheva, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1972, vol. II, 480 p. (in Russian)
- [Hydrogeology of the USSR. Voronezh, Kursk, Belgorod, Oryol, Lipetsk, Tambov regions]. A.T. Bobrysheva, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1972, vol. IV, 498 p. (in Russian)
- Golubnichii, D.V., Gilyazev, D.Kh., Ignatenko, I.M., Khaustov, V.V. [Features of ensuring environmental safety of underground mining of the Yakovlevskoye rich iron ore deposit]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2023, no. 2, pp. 94–103. (in Russian)
- Grigoriev, A.M., Zoteev, O.V., Makarov, A.B. [Geomechanical justification for massif monitoring during the development of ores of the Yakovlevskoye KMA deposit under undrained aquifers]. *Gornyi informatsionnoanaliticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, no. S4, pp. 27–37. (in Russian)
- 8. Gurkin, A.Ya., [The study of drainage system efficiency under complex draining conditions by the example of Yakovlevskoe ore deposit KMA]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) dissertation. Moscow, 1964, 17 p. (in Russian)
- Gusev, V.N., Ilyukhin, D.A., Zhuravlev, A.E. [Assessment of the degree of undermining strata disturbance by manmade water-conducting cracks according to geomechanical monitoring data in mine workings at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013, vol. 204, pp. 74–81. (in Russian)

- Gusev, V.N. [Forecast of safe conditions for developing a suite of coal seams under water bodies based on the geomechanics of man-made water-conducting cracks]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 221, pp. 638–643. (in Russian)
- 11. Dashko R.E. [Engineering geological characteristics and assessment of rich iron ores of the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 168, pp. 97–104. (in Russian)
- 12. Dashko, R.E., Feller, E.N. [Geotechnical and engineering geological assessment of the safety of mining rich iron ores at the Yakovlevskoe mine (Kursk magnetic anomaly)]. *Geotekhnika*, 2013, no. 5–6, pp. 26–38. (in Russian)
- Dashko, R.E., Feller, E.N. [Formation and development of mining geological processes depending on changes in engineering geological and hydrogeological conditions at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 199, pp. 151–160. (in Russian)
- Efremov, E.Yu., Rybnikov, P.A., Rybnikova, L.S. [Justification for draining the hydrogeodynamic system "water-bearing sediments - disintegrated massif" upon underground mining of iron ore deposits]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya, 2023, no. 3, pp. 47–57. (in Russian)
- Zhurin, S.N. [Management of the massif state upon underground mining of ferrous metal ore deposits under difficult hydrogeological conditions]. Extended abstract Doctoral Sci. (Techn.) dissertation. Moscow, MGGU Publ., 1998, 45 p. (in Russian)
- Zoteev, O.V. [Justification for safe mining of the central section of the Yakovlevskoe deposit upon expanding the excavation boundaries to -525 m horizon and existing mining allotment at the sides]. Yekaterinburg, IGD UrO RAN, 2020, 206 p. (in Russian)
- 17. Zoteev, O.V. [Justification of safe and effective conditions for mining the Yakovlevskoe iron ore deposit under an aquifer]. Yekaterinburg, IGD UrO RAN, 2007, 110 p. (in Russian)
- Zoteev, O.V., Makarov, A.B., Faustov, S.I. [Problems of mining Yakovlevskoye iron ore deposit]. *Izvestiya vysshikh* uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, 2008, no. 8, pp. 4–8. (in Russian)
- Ilyukhin, D.A. [Forecast of the development of waterconducting fracture zone during the development of Yakovlevskoe deposit of rich iron ores]. Cand. Sci. (Techn.) dissertation. St. Petersburg, 2014, 125 p. (in Russian)

- Kotlov, S.N., Tselishchev, N.A., Sotnik, E.A. Gilyazev, D.Kh. [Geological and hydrogeological factors of the formation of water inflows into the mine workings of the Yakovlevskoe mine]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 5, pp. 108– 113. (in Russian)
- 21. Kramchaninov, N.N., Petin, A.N., Pogorel'tsev, I.A. [Analysis of the groundwater state in the KMA mining region in the territory of the Belgorod oblast]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2011, no. 9 (104), pp. 166–172. (in Russian)
- 22. Petrov, D.N. [Formation of the stress-strain state of a mountain massif before and after drainage]. Zapiski Gornogo instituta, 2011, vol. 190, pp. 232–239. (in Russian)
- 23. Protosenya, A.G., Petrov, D.N., Sinyakin, K.G., Martem'yanov, G.A. [Field observations of the settlement of the ore ceiling during mining operations at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2011, vol. 190, pp. 158–162. (in Russian)
- 24. Protosenya, A.G., Potemkin, D.A. [Geomechanical justification of the parameters of the waterproof roof and protective ceiling during the development of the Yakovlevskoe deposit]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 168, no. 3, pp. 127–136. (in Russian)
- 25. [Development of recommendations for improving the mine field drainage system during the construction of the Yakovlevskii mine]. Zabeida, M.A., Zubova, A.V., Elantseva, L.A. Belgorod, VIOGEM Publ., 1990, 321 p. (in Russian)
- Sergeev, S.V., Lyabakh, A.I., Zaitsev, D.A. [Experience in the development of rich iron ores at the Yakovlevskoe deposit of the KMA]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo* gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki, 2011, no. 3 (98), pp. 200–208. (in Russian)
- Sergeev, S.V., Lyabakh, A.I., Kvachev, V.N., Sevryukov, V.V. [Geological and hydrogeological characteristics of the Yakovlevskoe deposit]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo* gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki. 2011, no. 9 (104), pp. 147–154. (in Russian)
- Sergeev, S.V. [Formation of rock pressure during the opening of KMA deposits]. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki, 2008, no. 3 (43), pp. 197-202. (in Russian).

- Sokolov, I.V., Smirnov, A.A., Antipin, Yu.G., Nikitin, I.V. [About formation of protective cushion in mining under open pit bottom with the caving methods at Udachnaya pipe]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. *Nauki o Zemle*, 2023, no. 2, pp. 322–334 (in Russian).
- Trubitsyn, D.S., Deshevykh, G.Yu. [Hydrogeological zoning of the territory of the southern part of the Central Federal District with clarification of the boundaries of structures of II and III orders]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geologiya*, 2021, no. 2, pp. 83–93. (in Russian)
 Trushko, V.L., Protosenya, A.G., Dashko, R.E. G
- Trushko, V.L., Protosenya, A.G., Dashko, R.E. G [Geomechanical and hydrogeological problems of development of the Yakovlevskoye deposit]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2010, vol. 185, pp. 9–18. (in Russian)
- 32. Trushko, V.L., Trushko, O.V. [Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 250, pp. 569–577. (in Russian)
- Trushko, O.V., Streletskii, A.V. [Modeling of the stressstrain state of ore mass at the Yakovlevskii mine during mining operations under a protective cover]. Zapiski Gornogo instituta, 2012, vol. 199, pp. 60–63. (in Russian)
- Tyutyukova, V.A., Golubnichii, D.V., Gilyazev, D.Kh. [Determination of the Earth's surface subsidence based on the results of joint interferometric processing of space radar sounding data from the Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, 2023, no. 2 (124), pp. 69–75. (in Russian)
- 35. Ustyugov, D.L. [Permanent hydrodynamic model of the Yakovlevskoe deposit of rich iron ores (Kursk magnetic anomaly)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 200, pp. 332–335. (in Russian)
- 36. Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J. Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport. Academic Press, 2nd Edition, 2015, 564 p.
- Gambolati, G., Teatini, P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection, *Water Resour.* 2015, vol. 51, pp. 3922–3955.
- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H. et al. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environ. Res. Lett.*, 2017, no. 12(6), paper 064006, 14 p.
- Pratt, W.E., Johnson, D.W. Local subsidence of the Goose Creek oil field. *Journal of Geology*,1926, vol. 34, pp. 577–590.