

Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 247—260.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(79):247—260.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК

doi: [556.16.06:622]:001.891.57

Применение геофильтрационной модели для адаптации гидрологических моделей стока с водосбора для долгосрочных прогнозов водопритока к действующим карьерам

***Леонид Игоревич Лесничий¹, Екатерина Владимировна Гайдукова²,
Кристина Ильинична Гриценко¹, Дмитрий Александрович Едакин³***

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, Lesnichiy_LI@pers.spmi.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет

³ АО «АГД ДАЙМОНДС»

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы, связанные с долгосрочными прогнозами стока с водосбора в условиях влияния на режим подземных вод горных работ. Площади водосборов разрабатываемых открытых горных выработок отличаются от природных водосборов тем, что они подвержены постоянному техногенному воздействию (расширению карьера, работе дренажных систем и т.п.). Существующие методы гидрологических долгосрочных прогнозов стока с водосбора нуждаются в соответствующей адаптации. В статье предложено для долгосрочных прогнозов водопритока к карьерам использовать модель склонового стока с сосредоточенными параметрами, а изменение коэффициентов этой модели (свойств водосбора) под действием горных работ, в частности дренажных мероприятий, прогнозировать с помощью геофильтрационной модели.

Ключевые слова: долгосрочные прогнозы стока, прогноз водопритока, карьер, открытые горные выработки, модель водосбора, геофильтрационная модель, сток с водосбора, подземный сток.

Для цитирования: Лесничий Л. И., Гайдукова Е. В., Гриценко К. И., Едакин Д. А. Применение геофильтрационной модели для адаптации гидрологических моделей стока с водосбора для долгосрочных прогнозов водопритока к действующим карьерам // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 247—260. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-247-260.

Original article

Application of groundwater flow modeling to adapt hydrological models of runoff from a catchment for long-term forecasts of water inflow to operating open-pit mines

**Leonid I. Lesnichii¹, Ekaterina V. Gaidukova²,
Kristina I. Gritsenko¹, Dmitrii A. Edakin³**

¹ St. Petersburg Mining University

² Russian State Hydrometeorological University

³ AGD Diamonds

Summary. The article discusses issues related to long-term forecasts of runoff from a catchment area under the influence of mining operations on the groundwater regime. The catchment areas of open-pit mines differ from the natural one by the presence of a constant technogenic impact on the environment (such as open-pit mining expansion, drainage system, etc.). Existing methods of long-term and ultra-long-term hydrological forecasts are applied to stable catchment systems. Therefore, for a catchment included an operating open-pit mine those methods have to be adapted.

Pits are, as a rule, the epicenters of man-made impact on the regime of groundwater. The inflow of groundwater into them is measured. Therefore, first of all, it is advisable to solve the problem of adapting hydrological methods of forecasting runoff from the catchment area to forecasting groundwater inflow to pits. The article suggests applying two methods simultaneously: the catchment model with concentrated parameters for forecasting a long-term inflow to operating open-pit mines and groundwater flow modeling to account for changes in the system (properties of the catchment area) under anthropogenic impact.

In the article an experiment was carried out to compare the results of forecasts of annual water inflow to the open-pit mines, made using a catchment model, with the results of groundwater flow modeling. Based on the results of the experiment, it was established that the values of annual water inflows to the operating open-pit mines calculated using a groundwater flow model can be predicted using the catchment model with concentrated parameters with high accuracy (prediction criterion $S/\sigma = 0,16—0,34$).

Keywords: open pit mining, water inflow forecast, seasonal variations in water inflow, ore deposit V. Griba, catchment, the slope runoff model, partly infinite modeling, efficient development of mineral deposits.

For citation: Lesnichii L. I., Gaidukova E. V., Gritsenko K. I., Edakin D. A. Application of groundwater flow modeling to adapt hydrological models of runoff from a catchment for long-term forecasts of water inflow to operating open-pit mines. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(79):(247—260). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-247-260. (In Russ.).

Введение

На территории России существует значительное количество месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом, эксплуатация которых осуществляется или планируется на многие десятилетия (карьеры Курской магнитной аномалии, апатит-нефелиновых руд Хибинского массива и т.п.). Для их эффективной и безопасной отработки важным является своевременное получение долгосрочных прогнозов изменения годового притока подземных вод к ним [1, 2], а также оценка влияния открытых горных работ на сток рек, в том числе

в условиях изменяющегося климата [3]. Поскольку карьеры и разрезы являются, как правило, эпицентрами техногенного воздействия на режим природных вод, то из этих двух задач следует выделить первую — задачу прогноза годового притока подземных вод к карьерам и разрезам.

Решение поставленной задачи осложняется тем, что действующие карьеры с их площадью водосбора являются объектами, подверженными постоянному техногенному воздействию (расширение карьера, создание дренажных систем, в том числе водопонижающих скважин, нагорных канав и т.п.). Как следствие, при долгосрочных прогнозах необходимо одновременно учитывать влияние как природных, так и техногенных факторов.

Методы расчета изменений режима подземных вод и водопритока к карьерам и разрезам, возникающие вследствие возможных техногенных воздействий при ведении горных работ, достаточно хорошо разработаны в горно-промышленной гидрогеологии [4, 5]. Наиболее распространенным методом является применение геофильтрационной модели [5—7], но найти в литературе случаи практического применения геофильтрационной модели для регулярных прогнозов водопритока подземных вод не удалось. Связано это с тем, что в геофильтрационной модели в качестве внешнего воздействия (верхнего граничного условия) задается инфильтрационное питание, прогнозная величина которого, как правило, неизвестна. Гидрогеологические прогнозы водопритока к карьерам носят сценарный характер при заданных средних и экстремальных воздействиях природных факторов.

Для прогнозов годового стока с помощью геофильтрационной модели необходим прогноз инфильтрационного питания, т.е. необходимо создание комплексной гидрологической модели водосбора с распределенными параметрами, описывающей основные стокоформирующие процессы на водосборе (испарение и транспирацию, поверхностный сток, снеготаяние и т.п.). Создание таких моделей является перспективным направлением развития гидрологических прогнозов, но в настоящее время их широкое применение на территории России затруднительно [8]. Альтернативой такому подходу являются гидрологические модели водосбора с сосредоточенными параметрами, но они не применяются для прогноза подземного стока с водосбора для действующих карьеров. Очевидно, это связано с необходимостью учитывать техногенные изменения на водосборе. Таким образом, с помощью геофильтрационной модели можно спрогнозировать техногенное воздействие, а с помощью гидрологических моделей водосбора с сосредоточенными параметрами — изменение притока к карьере под действием природных факторов [9, 10].

Следует обратить внимание на тот факт, что техногенные воздействия на площади водосбора карьерного поля, как правило, планируются (предусматриваются проектом) и воздействие их на режим подземных и поверхностных вод и водоприток в карьер может быть спрогнозировано. В частности, с помощью геофильтрационной модели может быть рассчитано изменение водопритока к карьере подземных вод при заданном (проектном) дебите контура водопонижающих

скважин (ВПС). Перспективным представляется совместное применение для прогнозов притока к карьере методов гидрологических и гидрогеологических прогнозов. В связи с этим цель данной работы состоит в оценке возможности применения геофильтрационной модели для адаптации гидрологических моделей для прогнозов среднегодовых величин водопритока к действующим карьерам.

Уточнение задачи, методика исследования

Для решения поставленной задачи из известных методов прогноза стока с водосбора была выбрана модель водосбора с сосредоточенными параметрами [9] вида:

$$\tau \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k} Q = \dot{X}, \quad (1)$$

где Q — сток, м³/сут; k , τ — коэффициенты модели (коэффициент, характеризующий потери притока и коэффициент, характеризующий время реакции на внешнее воздействие); $\dot{X}$ — питание (атмосферные осадки), м³/сут; t — время, сут.

Выбор этой модели обусловлен тем, что она успешно применялась для прогнозов сезонных изменений водопритока к отработанным карьерам [11], а также тем, что она является ядром стохастической модели, применяемой для долгосрочных прогнозов минимального стока с водосбора в условиях неустановившегося климата [12], но для прогнозов в условиях действующих карьеров модель (1) нуждается в соответствующей адаптации. Основным недостатком модели с сосредоточенными параметрами является то, что техногенные воздействия на режим подземных и поверхностных вод отражаются в изменении коэффициентов модели. В частности, понижение уровней подземных вод вследствие дренажного влияния карьера или водопонижающих скважин при неизменном коэффициенте фильтрации, приводит к уменьшению водопроводимости и запасов воды. В отличие от геофильтрационной модели для модели с сосредоточенными параметрами (1) это будет означать изменение ее коэффициентов. Следовательно, целесообразность применения модели (1) для прогнозов водопритока к карьерам зависит от того, насколько характерные для отработки месторождений открытым способом техногенные изменения повлияют на изменение коэффициентов модели и насколько эти изменения могут быть учтены (спрогнозированы). Для ответа на этот вопрос был поставлен численный эксперимент. Он состоял из трех основных этапов.

На первом этапе была создана геофильтрационная модель исследуемого района. На втором этапе с помощью созданной геофильтрационной модели был рассчитан водоприток в карьер для различных вариантов техногенного воздействия на режим подземных вод. На третьем этапе численного эксперимента полученные ряды водопритока к карьере были рассчитаны (спрогнозированы) с помощью модели водосбора (1) при постоянных коэффициентах и линейно зависящих от заданного техногенного воздействия (дебита дренажной системы).

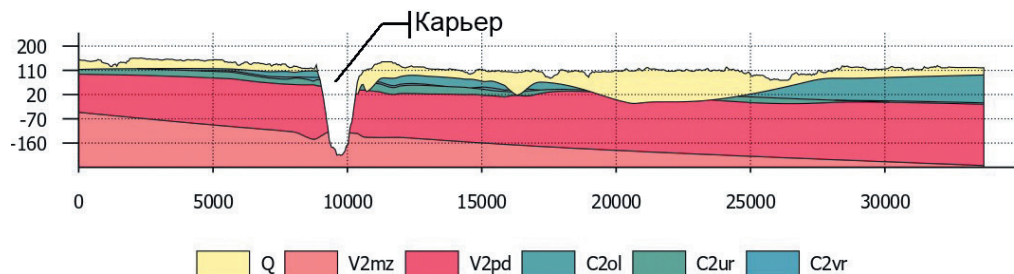


Рис. 1. Геологический разрез рассматриваемой территории.

Fig. 1. Geological section of the territory under consideration.

Численный эксперимент

На первом этапе в качестве объекта исследования для проведения численного эксперимента был выбран один из действующих карьеров Зимнего Берега Белого моря с действующей дренажной системой, высокой изученностью площади водосбора карьерного поля и развитой системой гидрологического и гидрогеологического мониторинга, позволяющей создать надежную (точную) геофильтрационную модель. К 2024 г. глубина карьера составила более 300 метров. Им были вскрыты четвертичные отложения (Q) (олмуго-окуневская (C_{2ol}), воереченская (C_{2vr}), урзугская (C_{2ur}) свиты карбона, падунская (V_{2pd}) и мезенская (V_{2mz}) свиты венда. Геологический разрез района месторождения представлен на рис. 1.

Была создана геофильтрационная модель площади водосбора карьера, состоящая из шести слоев, соответствующих выделенным на месторождении водоносным и водоупорным горизонтам:

- водоносному комплексу четвертичных отложений;
- карбон-пермскому водоносному комплексу, в котором выделены три водоносных горизонта, приуроченных к доломитам олмуго-окуневской свиты, подстилающим их песчаникам и алевролитам воереченской свиты, а также песчаникам урзугской свиты;
- комплексу водоносных отложений падунской свиты венда представленного преимущественно песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов;
- комплексу слабопроницаемых отложений мезенской свиты венда представленного переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов.

Построение геофильтрационной модели и последующие расчеты выполнялись посредством программного комплекса «НИМФА» («Логос Гидрогеология»). Эта программа использует неструктурированную сетку с поддержкой выклинивания. Размер сетки в радиусе пяти километров от карьера составлял пятьдесят метров, на больших удалениях — один километр.

Значения принятых фильтрационных параметров для слоев модели (гидрогеологических подразделений) представлены в табл. 1.

Принятые параметры для водоносных горизонтов
Hydrological properties for aquifers used for the test simulation

Характеристика	Q	C_{2ol}	C_{2vr}	C_{2ur}	V_{2pd}	V_{2mz}
Коэффициент фильтрации (k_{xy}), м/сут	30	25	0,1	2,5	1,2	0,002
Вертикальный коэффициент фильтрации (k_z), м/сут	3	0,1	0,005	0,5	0,1	0,0002
Коэффициент упругости, 1/м	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,00001	0,00001
Гравитационная водоотдача	0,02	0,02	0,005	0,05	0,04	0,0001

При идентификации геофильтрационной модели было задано два расчетных периода. Первый — стационарный, имитирующий ненарушенный природный режим до начала разработки карьера (соответствует временному интервалу до 2011 г.). Второй — расчетный нестационарный период с четырнадцатью стресс-периодами (период 2011—2023 гг.), имитирующий этапность отработки месторождения, который калибровался при известных (фактических) производительностях техногенного воздействия водопонижающих скважин и фактического положения (формы) карьера.

Отметим следующее: при калибровке модели принятые параметры водоносных горизонтов изменялись в последнюю очередь. Прежде всего, значения руслового сопротивления подбирались таким образом, чтобы, с одной стороны, фактические уровни воды в скважинах соответствовали расчетным, а с другой — величины стока рек соответствовали величине их подземного питания, полученные по данным гидрометрических наблюдений. Модель калибровалась так, чтобы достичь соответствия уровней подземных вод и балансовых характеристик рек на участке карьера. Главным контролирующим параметром при этом выступала сходимость модельных притоков в карьер с фактической производительностью карьерного водоотлива.

На втором этапе численного эксперимента созданная геофильтрационная модель использовалась для имитации (задания) двух различных карьеров с двумя вариантами техногенного воздействия на режим подземных вод, а именно:

— были заданы две конфигурации карьера: первый вариант — вскрытие всей мощности четвертичных отложений (50 м), второй вариант — вскрытие толщи пород до подошвы падунских отложений (глубина карьера 270 м);

— для имитации техногенного воздействия был использован существующий контур водопонижающих скважин с различными величинами дебита.

Варианты задания изменений техногенного воздействия предусмотрены в двух постановках:

- 1) откачка из водопонижающего контура вокруг всего карьера;
- 2) при отсутствии воздействия.

Принятые величины внешних (техногенных) воздействий и заданного инфильтрационного питания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Принятые величины инфильтрационного питания (I) и техногенного воздействияUsed values of recharge (I) and technogenic impact

Год	I , мм/год	Откачка по контуру ВПС, м ³ /сут
2011	120	0
2012	168	56500
2013	114	56500
2014	132	56500
2015	101	56500
2016	131	79100
2017	147	79100
2018	145	79100
2019	202	79100
2020	179	79100
2021	121	79100
2022	138	79100
2023	142	79100

В результате тестовых расчетов получены по два ряда данных водопритока для каждой из двух выбранных конфигураций карьера.

На третьем этапе численного эксперимента полученные ряды данных использованы для прогнозов водопритока к карьере с помощью модели водосбора. Считая полученные по геофильтрационной модели значения водопритоков истинными, для двух карьеров была создана модель водосбора с сосредоточенными параметрами и выданы ретроспективные прогнозы среднегодовых значений водопритока (с заблаговременностью 1 год) по методике, изложенной в [11]. Модель (1) была представлена в численной реализации в виде:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t + \frac{\Delta t}{\tau} \dot{X}_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t, \quad (2)$$

где t — момент времени; Δt — шаг по времени, равный заблаговременности прогноза.

Для модели (1) была выполнена процедура идентификации параметров и проведена оценка точности модели (оправдываемости прогноза) по критериям S/σ и S/σ_Δ [13], где S — среднеквадратическая ошибка прогноза, м³/сут; σ — среднеквадратическое отклонение предсказываемой переменной от нормы, м³/сут; σ_Δ — среднеквадратическое отклонение изменения предсказываемой переменной от среднего ее изменения за период заблаговременности, м³/сут.

Задаваемые техногенные воздействия (откачка по контуру водопонижающих скважин), с точки зрения модели с сосредоточенными параметрами, — это изменение свойств системы (коэффициентов модели). Для решения задачи учета техногенных изменений были созданы варианты модели (2), где ее коэффициенты задавались как линейные функции от внешнего воздействия или прошлого состояния системы (величины водопритока в карьере) в соответствии с подходом [14].

Результаты исследования

Результаты выполненных с помощью геофильтрационной модели расчетов среднегодовых водопритоков к карьерам, вскрывшим падунские отложения, представлены на рис. 2 и 3.

Полученные с помощью геофильтрационной модели значения годового водопритока были спрогнозированы (с заблаговременностью 1 год) с помощью

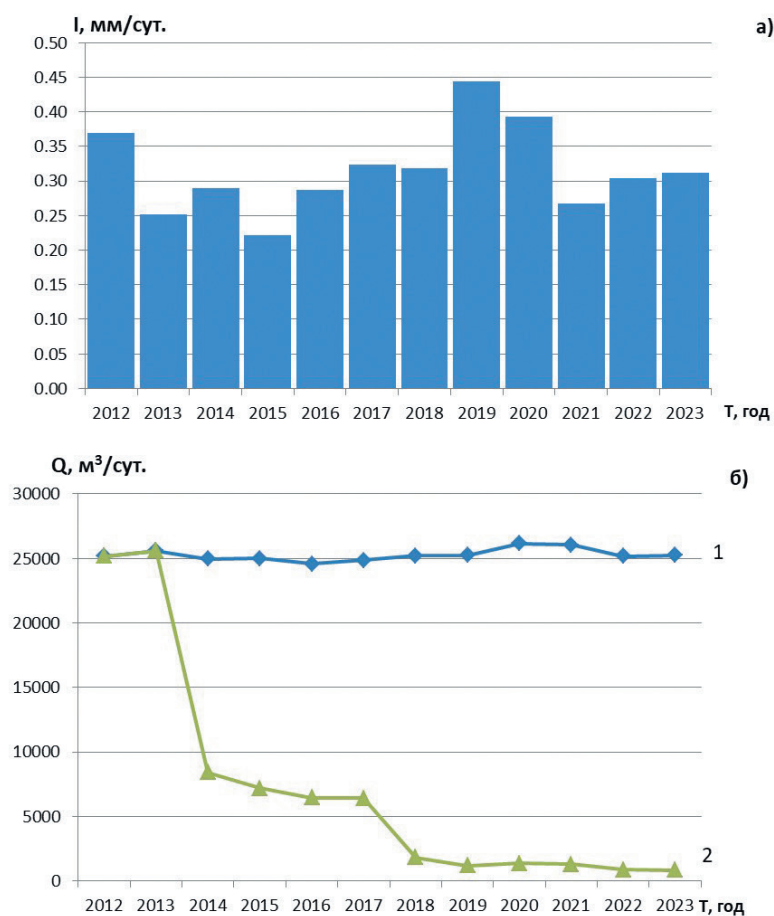


Рис. 2. Модельные значения водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные отложения (б) при заданном инфильтрационном питании (а):

- 1 — без влияния контура водопонижающих скважин;
- 2 — с откачкой из контура водопонижающих скважин.

Fig. 2. Model values of water inflow to pit that exposed Quaternary deposits (b) with a given infiltration recharge (a).

- 1 — without the influence of the contour of dewatering wells;
- 2 — with pumping from the contour of dewatering wells.

модели водосбора (1). Результаты расчетов (прогнозов) представлены в сводной табл. 3 и на рис. 4—7.

Таблица 3

Характеристики модели водосбора для прогноза годового водопритока
Parameters of the water catchment model for annual water inflow forecasting

Характеристика	Влияние дренажного комплекса отсутствует	Откачка из контура ВПС
Карьер в четвертичных отложениях		
S , м ³ /сутки	79,7	3382
σ , м ³ /сутки	442,8	9904
σ_{Δ} , м ³ /сутки	483,4	4953
S/σ	0,18	0,34
S/σ_{Δ}	0,16	0,68
$0,674\sigma$	100 %	91,7 %
Модель карьера в падунских отложениях		
S , м ³ /сутки	3516	4523
σ , м ³ /сутки	13239	28644
σ_{Δ} , м ³ /сутки	10976	11930
S/σ	0,27	0,16
S/σ_{Δ}	0,32	0,38
$0,674\sigma$	100 %	100 %

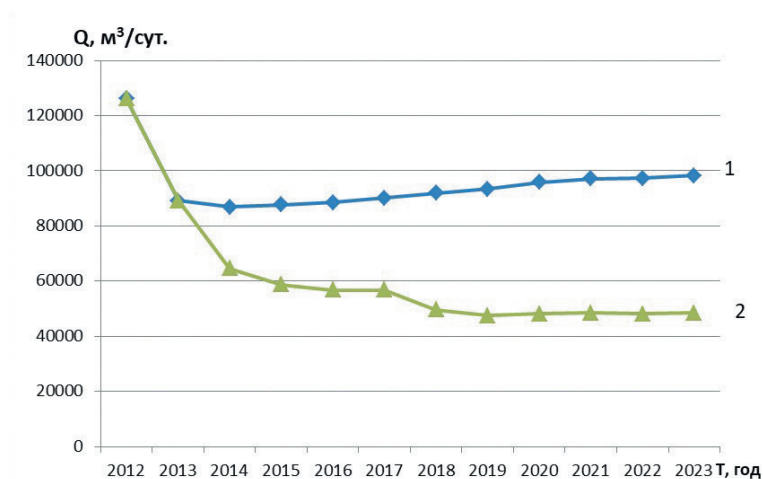


Рис. 3. Модельные значения водопритока к карьерам, вскрывшим падунские отложения.

- 1 — без влияния контура водопонижающих скважин;
2 — с откачкой из контура водопонижающих скважин

Fig. 3. Model values of water inflow to pit that exposed Padun deposits.

- 1 — without the influence of the contour of dewatering wells;
2 — with pumping from the contour of dewatering wells.

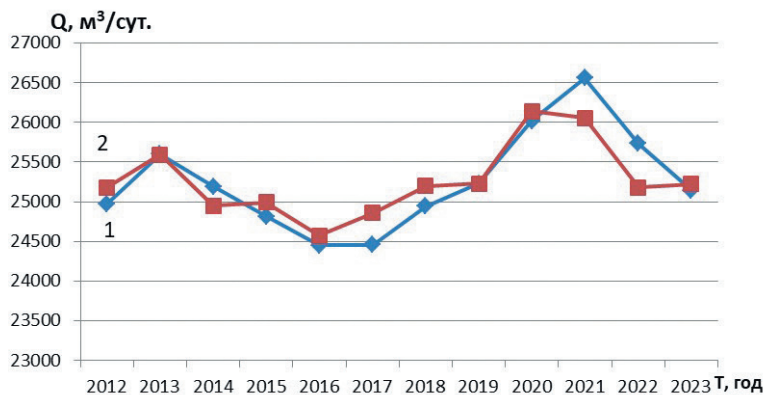


Рис. 4. Спрогнозированные по модели водосбора (1) и рассчитанные с помощью геофильтрационной модели (2) значения среднегодового водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при отсутствии воздействия дренажной системы.

Fig. 4. Forecasted by the catchment model (1) and actual (2) values of average annual water inflow to the pit that exposed Quaternary deposits, in the absence of the impact of the drainage system.

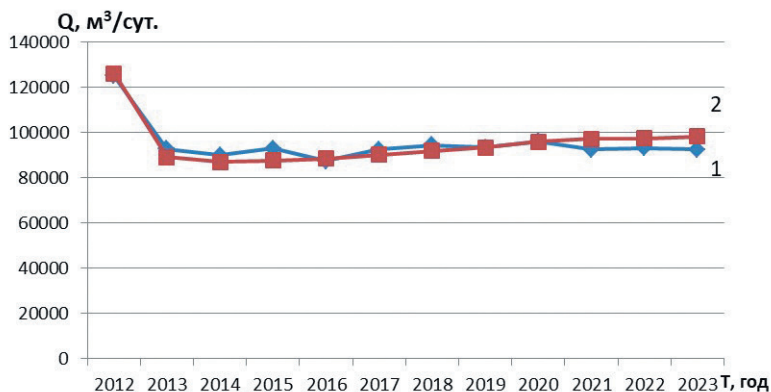


Рис. 5. Спрогнозированные по модели водосбора (1) и рассчитанные с помощью геофильтрационной модели (2) значения среднегодового водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при отсутствии воздействия дренажной системы.

Fig. 5. Forecasted by the catchment model (1) and actual (2) values of average annual water inflow to the pit that exposed Padun deposits, in the absence of the impact of the drainage system.

Из представленной табл. 3 и рис. 4—7 видно, что точность прогнозов по модели водосбора рядов водопритока, сгенерированного геофильтрационной моделью, по критерию S/σ составляла от 0,16 до 0,34; в пяти из шести рассмотренных вариантах 100 % прогнозных значений находились в интервале $0,674\sigma$. Такие прогнозы принято относить к категории «отличных» [13].

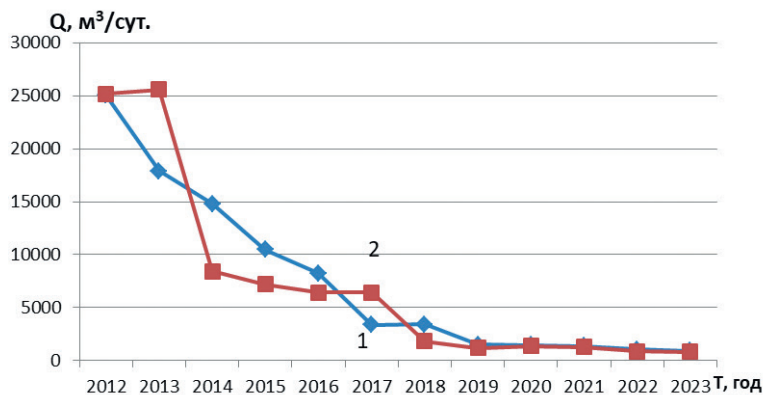


Рис. 6. Спрогнозированные по модели водосбора (1) и рассчитанные с помощью геофильтрационной модели (2) значения среднегодового водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при откачке на контуре ВПС.

Fig. 6. Forecasted by the catchment model (1) and actual (2) values of average annual water inflow to the pit that exposed Quaternary deposits with impact caused by pumping wells system.

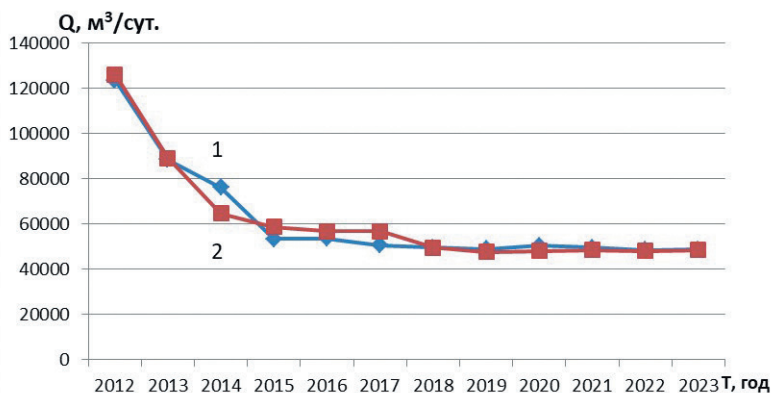


Рис. 7. Спрогнозированные по модели водосбора (1) и рассчитанные с помощью геофильтрационной модели (2) значения среднегодового водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при откачке на контуре ВПС.

Fig. 7. Forecasted by the catchment model (1) and actual (2) values of average annual water inflow to the pit that exposed Padun deposits with impact caused by pumping wells system.

Характер описания моделью водосбора (1) ряда водопритока в карьер в различных условиях вскрытия карьера и работы дренажного комплекса имеет свои особенности. Полученные зависимости и способы их учета в общей прогностической модели могут быть разные, в зависимости от гидрогеологических и климатических условий карьерных полей. Качество и количество информации о геологических условиях гидрогеологического мониторинга могут значительно повлиять

на точность геофильтрационной модели, а значит — и на точность долгосрочных прогнозов годового притока. В дальнейшем этим вопросам следует уделить особое внимание как определяющим границы применимости модели (1) для прогнозов водопритока к действующим горным выработкам. Их решение требует обобщения результатов исследований на нескольких месторождениях. На данном этапе можно сделать один вывод: модель (1) описывает техногенные воздействия на водосбор при ведении горных работ с достаточной точностью (S/σ , 0,16—0,34) для геолого-гидрогеологических условий Зимнего Берега Белого моря.

Заключение

Анализ результатов проведенного численного эксперимента показал, что рассчитанные с помощью геофильтрационной модели значения среднегодового водопритока подземных вод к карьеру могут быть спрогнозированы с помощью модели водосбора с сосредоточенными параметрами с высокой точностью (оправдываемостью).

Введение для учета техногенных воздействий на режим подземных вод переменных коэффициентов модели позволило для геолого-гидрогеологических условий Зимнего Берега Белого моря достичь оправдываемости прогнозов по критерию S/σ 0,16—0,34. Таким образом, при наличии достаточно длительного (10—15 лет) фактического ряда наблюдений за водопритоком в карьер и хорошо откалиброванной геофильтрационной модели можно определить (спрогнозировать) изменения коэффициентов модели водосбора с сосредоточенными параметрами, при заданных проектных (прогнозных) техногенных воздействиях (изменениях работы контура водопонижающих скважин и т.п.). Это создает возможность применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов годового водопритока для действующих карьеров.

Карьер — эпицентр техногенных воздействий на режим подземных вод, поэтому возможность адаптации модели с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов к открытым горным выработкам должна означать также возможность ее применения для долгосрочных прогнозов изменений подземного питания водоемов и водотоков вследствие техногенных изменений в режиме подземных вод.

Список литературы

1. Лисицкий А. В. Совершенствование системы управления шахтным водоотливом за счет краткосрочного прогноза водопритоков // Записки Горного института. 2002. Т. 150. № 1. С. 96—99.
2. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Пономаренко М. Р. и др. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений // Горный журнал. 2023. № 5. С. 69—74. doi: 10.17580/gzh.2023.05.10.
3. Shevnina E., Silaev A. The probabilistic hydrological marcs hydro (the Marhov chain system) model: its structure and core version 0.2 // Geoscientific Model Development. 2019. Т. 12. № 7. Р. 2767—2780.
4. Норватов Ю. А., Сергутин М. В. Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки Горного института. 2015. Т. 212. № 5. С. 89—94.
5. Мироненко В. А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 2001. 519 с.

6. Christian D. Langevin, Joseph D. Hughes, Edward R. Banta, et al. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Reston: U.S. Geological Survey, 2017. Book 6. Modeling Techniques. Section A. Groundwater. Chapter 55. 197 p.
7. Kotlov S., Saveliev D., Shamshev A. Peculiarities of numerical modeling of the conditions for the formation of water inflows into open-pit workings when constructing the protective watertight structures at the Koashvinsky quarry. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London: CRC Press, 2018. P. 827—832.
8. Кучмент Л. С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года», Том 1. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2015. С. 74—80.
9. Коваленко В. В. Викторова Н. В. Гайдукова Е. В. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: РГГМУ, 2006. 556 с.
10. Кучмент Л. С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
11. Лесничий Л. И. Гриценко К. И. Метод прогноза сезонных изменений водопритока к подземным горным выработкам на основе модели водосбора с сосредоточенными параметрами // *Геозкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2023. № 6. С. 79—83. doi: 10.31857/S086978092306005X.
12. Коваленко В. В. Викторова Н. В. Гайдукова Е. В. и др. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов воды проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. СПб.: РГГМУ, 2010. 52 с.
13. Попов Е. Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
14. Коваленко В. В. Гайдукова Е. В. Хаустов В. А. и др. Частично инфинитное моделирование развивающихся гидрологических систем. СПб.: РГГМУ, 2021. 120 с.

References

1. Lisitskii A. V. Improvement of mine drainage management system by means of short-term forecast of water inflows. *Zapiski Gornogo institute = Journal of Mining Institute*. 2002; 150 (1): (96—99). (In Russ.).
2. Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Ponomarenko M.R., et al. Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2023; (5): (69—74). doi: 10.17580/gzh.2023.05.10. (In Russ.).
3. Shevnina E., Silaev A. The probabilistic hydrological marcs hydro (the Marhov chain system) model: its structure and core version 0.2. *Geoscientific Model Development*. 2019; 12(7): 2767—2780.
4. Norvatov Yu. A., Sergutin M. V. Forecast of water inflows into mine workings in the process of combined open-underground ore mining operations. *Zapiski Gornogo institute = Journal of Mining Institute*. 2015; (212): (89—94). (In Russ.).
5. Mironenko V. A. *Dinamika podzemnich vod = Dynamics of groundwater*. Moscow: MGU Publ., 2001: 519 p. (In Russ.).
6. Christian D. Langevin, Joseph D. Hughes, Edward R. Banta, et al. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Reston: U.S. Geological Survey. *Modeling Techniques. Section A. Groundwater*: Chapter 55, 2017: 197 p.
7. Kotlov S., Saveliev D., Shamshev A. Peculiarities of numerical modeling of the conditions for the formation of water inflows into open-pit workings when constructing the protective watertight structures at the Koashvinsky quarry. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London: CRC Press. 2018; 827—832.
8. Kuchment L. S. Problems of choosing themodels of drain formation to solve practical tasks. *Sborniknauchnykh trudov = Nauchnoe obespechenie realizatsii «Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda» = Collection of scientific works: scientific ensuring of implementation of «The water strategy of the Russian Federation for the period till 2020»*. Petrozavodsk, KarRC RAS. 2015; (74—81). (In Russ.).
9. Kovalenko V. V., Viktorova N. V., Gaidukova E. V. *Modelirovaniye gidrologicheskikh protsessov = Modeling hydrodynamic processes. 2nd edition*. St. Petersburg: RGGMU Publ., 2006: 558 p. (In Russ.).

10. Kuchment L. S. *Modeli protsessov formirovaniya rechnogo stoka = River runoff models*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980: 143 p. (In Russ.).
11. Lesnichii L. I., Gritsenko K. I. Method of predicting seasonal variations in water inflow to underground mine workings using the water catchment model with concentrated parameters. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2023; (6): (79—83). doi: 10.31857/S086978092306005X (In Russ.).
12. Kovalenko V. V., Victorova N. V., Gaidukova E. V., et al. *Metodicheskie rekomendatsii po osenke obespechennich raschodov vodi proektiruemich gidrotehnicheskich soorujeniy pri neustanovivshemsya climate. = The methodical recommendations according to the supplied charges of projected hydraulic engineering structures at the unsteady climate*. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2010: 51 p. (In Russ.).
13. Popov E. G. *Gidrologicheskie prognozi. 2-oe izdanie = Hydrological forecasts. 2nd edition*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1979: 257 p. (In Russ.).
14. Kovalenko V. V., Gaidukova E. V., Khaustov V. A., et al. *Chastichno infinitnoe modelirovanie razvivayushichsya gidrologicheskich sistem = Partially infinite modeling of developing hydrological systems*. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2021: 120 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Лесничий Леонид Игоревич, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Научный центр геомеханики и проблем горного производства, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии и экологии, Lesnichiy_LI@pers.spmi.ru.

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, заведующий кафедрой инженерной гидрологии.

Гриценко Кристина Ильинична, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Научный центр геомеханики и проблем горного производства, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии и экологии.

Едакин Дмитрий Александрович, Техническое управление АО «АГД Даймондс», начальник.

Information about authors

Leonid Igorevich Lesnichii, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Scientific Center of Geomechanics and Mining Problems, Lead Engineer of the Laboratory of Hydrogeology and Ecology.

Ekaterina Vladimirovna Gaidukova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Russian State Hydrometeorological University, Head of the Department of Engineering Hydrology.

Kristina Ilinichna Gritsenko, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Scientific Center of Geomechanics and Mining Problems, Lead Engineer of the Laboratory of Hydrogeology and Ecology.

Dmitrii Aleksandrovich Edakin, AGD Diamonds, Head of Technical Department.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 25.12.2024

Принята к печати после доработки 05.05.2025

The article was received on 25.12.2024

The article was accepted after revision on 05.05.2025