

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ  
И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.3:622.841

МЕТОД ПРОГНОЗА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДОПРИТОКА  
К ПОДЗЕМНЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ  
ВОДОСБОРА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

© 2023 г. Л. И. Лесничий<sup>1,\*</sup>, К. И. Гриценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ),  
21 линия Васильевского острова 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

\*E-mail: Lesnichiy\_LI@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Для прогноза сезонных изменений водопритоков к горным выработкам авторами предложено использовать модель водосбора с сосредоточенными параметрами. Ранее, на примере трех объектов, разрабатывающих месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, показана ее эффективность для прогнозов сезонных изменений водопритоков к открытым горным выработкам. В данной статье на основании предлагаемой модели водосбора разработана простая, не требующая специального программного обеспечения, методика составления прогноза. Приведен пример ее применения для прогноза среднемесячных значений водопритока с заблаговременностью один месяц к одной из шахт Кузбасса.

**Ключевые слова:** прогноз водопритоков, горные выработки, частично-инфинитное моделирование, модель водосбора

DOI: 10.31857/S086978092306005X, EDN: ZGAJJD

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возможно выполнять расчеты притоков подземных вод к объектам при помощи большого количества численных и аналитических методов [4, 6–9, 13]. В последние два десятилетия наиболее распространенной практикой стал расчет водопритоков с использованием математических моделей. Их применение обусловлено не только точностью расчетов, но и возросшей доступностью этих методов и универсальностью их применения для разных геолого-гидрогеологических условий. В качестве математических моделей, как правило, применяются геофильтрационные модели, основанные на законе Дарси и уравнении неразрывности [7].

Общеизвестна эффективность этих моделей для расчетов средних и максимальных значений водопритоков. Но в литературе не удалось найти примеров по их успешному и широкому применению для оперативных, регулярных прогнозов сезонных изменений водопритоков с заданной заблаговременностью (например, среднемесячных значений водопритоков с заблаговременностью один месяц). Связано это, прежде всего, с тем, что сезонные изменения уровня режима подземных вод и водопритоков к горным выработкам во многом определяются изменением

условий питания водоносных горизонтов, входом в геофильтрационную модель – условиями на ее гидродинамических границах. Например, инфльтрационным питанием, распределение которого ни по площади водосбора, ни во времени достоверно неизвестно, в связи с отсутствием прямых наблюдений. Решением в этом случае может стать создание комплексной модели водосбора. Например, для прогноза водопритоков, вызванных процессами снеготаяния, комплексная модель должна включать в себя следующие модели: процесса снеготаяния, поверхностного стока и поступления питания в зону аэрации, влагопереноса в ненасыщенной зоне, и геофильтрационную модель. Очевидно, что обеспечить такую сложную модель точными и специфическими параметрами и данными затруднительно.

Другое решение прямо противоположно и заключается в упрощении представлений о водосборе путем пространственного осреднения описывающей его модели. В частности, известна модель склонового сосредоточенного притока с водосбора вида (1). Приведенная модель получена [3] осреднением двумерной модели стекания по водосбору [5]. В рамках частично инфинитного моделирования было обосновано ее применение для прогнозов как суммарных притоков (подземного, по-

верхностного и речного стока) с водосбора, так и отдельно поверхностного и подземного стоков (минимального 30-суточного стока) [2].

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

где  $Q$  – сток с водосбора (приток в рудник), м<sup>3</sup>/сут;  $\tau$  – время добегания, сут;  $k$  – коэффициент стока;  $\dot{X}$  – эффективные осадки, м<sup>3</sup>/сут;  $t$  – время, сут.

Для модели (1) нет различий в том, чем дренируется сток с водосбора: рекой, озером, карьером или рудником. Свойства этого объекта, как и всего водосбора, “сжатого” в точку, отражены в коэффициентах модели. По этой причине модель водосбора с сосредоточенными параметрами может быть использована для прогнозов водопритоков и к карьерам, и к подземным горным выработкам. Но эффективность и границы ее применения должны быть установлены и обоснованы [2].

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для оценки применимости модели (1) для прогнозов водопритоков к карьерам и подземным горным выработкам проведен ряд исследований. На первом этапе проведена оценка применимости этой модели для прогнозов среднегодовых значений притоков к горным предприятиям, разрабатывающим месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива (Коашвинский и Ньюрпахкский карьеры и Кировский рудник с комбинированной разработкой). Расчеты показали “хорошую” оправдываемость прогнозов. Точность прогнозов по критерию  $S/\sigma$  [11] составила: 0.34 для Коашвинского и 0.57 для Ньюрпахкского карьеров. Для Кировского рудника значение критерия  $S/\sigma$  для ряда среднемесячных притоков составило 0.58. Подробно результаты первого этапа исследований представлены в [1].

На втором этапе исследований была проведена оценка применимости модели для прогнозов среднемесячных значений притоков с заблаговременностью один месяц для подземных горных выработок на примере одной из шахт Кузнецкого угольного бассейна. Результаты исследований представлены в настоящей статье.

Для практического применения разработанных методов прогноза наибольший интерес представляют те, реализация которых на производстве не требует высокой квалификации персонала и использования специализированного программного обеспечения. Поэтому из семейства моделей водосбора и их численных реализаций для расчета притока к подземным горным выработкам была рассмотрена численная реализация модели (2) с корректировкой, задачу идентификации пара-

метров которой можно свести к решению системы линейных алгебраических уравнений.

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

где  $t$  – момент времени;  $\Delta t$  – шаг по времени, равный заблаговременности прогноза.

Под корректировкой понимается то, что на каждом временном шаге в качестве  $Q_t$  задаются фактические (измеренные) значения расходов воды. Шаг расчета равен заблаговременности прогноза. При наличии рядов фактических наблюдений за расходами ( $Q_1, \dots, Q_n$ ) и осадками ( $X_1, \dots, X_n$ ) задача идентификации параметров модели может быть сформулирована, как нахождение коэффициентов модели, при использовании которых ошибка расчета (прогноза) будет минимальна, т.е. решена с помощью метода наименьших квадратов [12].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{\text{нп}} - Q_t^{\text{ф}})^2}{n-1}} \rightarrow 0, \quad (3)$$

где  $S$  – среднеквадратическая ошибка расчетов, м<sup>3</sup>/сут;  $Q_t^{\text{ф}}$  – фактический (измеренный) сток с водосбора в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/сут;  $Q_t^{\text{нп}}$  – рассчитанный по модели сток с водосбора в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/сут;  $n$  – длина ряда наблюдений.

Подставив (2) в (3) и преобразуя, получаем:

$$f(k, \tau) = \sum_{t=1}^n \left( Q_t - Q_{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{\tau} X_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t \right)^2 \rightarrow 0. \quad (4)$$

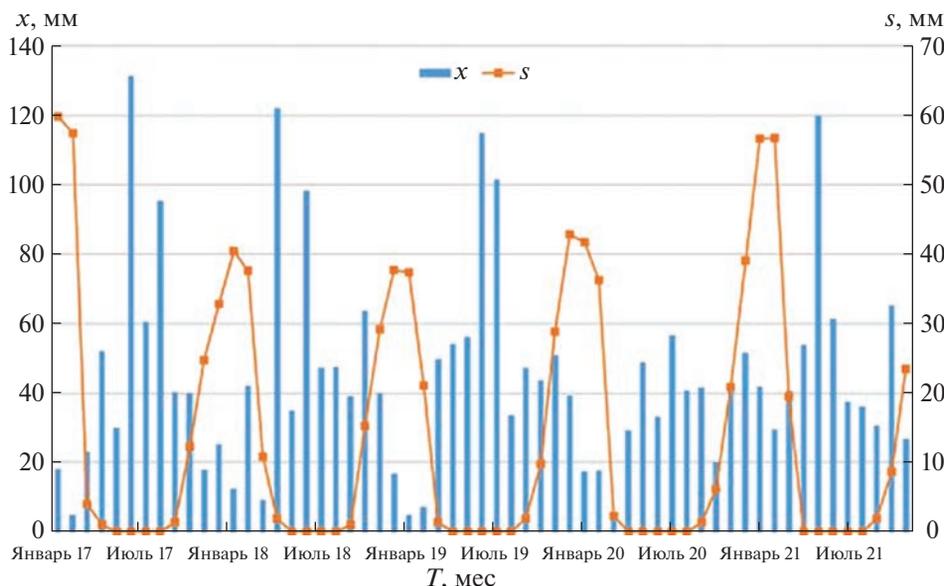
В случае использования модели с корректировкой начальных условий, когда все члены рядов  $Q_t$ ,  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $X_t$  в (4) известны, решая задачу минимума, можно найти коэффициенты  $k$  и  $\tau$  аналитически.

Аналитическое решение можно получить как для случая, когда  $k = \text{const}$  и  $\tau = \text{const}$ , так и для ряда случаев с переменными значениями коэффициентов  $1/k = f(Y_1)$  и  $1/\tau = f(Y_2)$ , где  $Y_1$  и  $Y_2$  – известные измеренные параметры (например, температура воздуха, атмосферные осадки, величина снежного покрова, уровни воды и т.п.), в том числе данные дистанционного зондирования Земли [10].

Для случая  $k = \text{const}$  и  $\tau = \text{const}$  решение выглядит следующим образом:

$$\tau = \frac{\Delta t \cdot (A_1^2 - A_3 \cdot A_5)}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}, \quad (5)$$

$$k = \frac{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}{A_1^2 - A_2 \cdot A_1 - A_3 \cdot A_5 + A_4 \cdot A_5}, \quad (6)$$



**Рис. 1.** Данные о суммарных за месяц атмосферных осадках ( $x$ ) и среднемесечной высоте снежного покрова ( $s$ ) на метеостанции Мыски.

$$\begin{aligned}
 \text{где } A_1 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t), \quad A_2 = \sum_{t=1}^n (Q_{t+\Delta t} \cdot X_t), \\
 A_3 &= \sum_{t=1}^n (Q_t)^2, \\
 A_4 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_{t+\Delta t}), \quad A_5 = \sum_{t=1}^n (X_t)^2.
 \end{aligned}$$

Это решение позволяет предложить следующую методику составления оперативных прогнозов среднемесечных значений водопритоков:

1. Ряд совместных наблюдений за водопритоком и осадками разделяется на две равные части, длиной не менее 15–20 наблюдений.
2. По первой половине ряда рассчитываются коэффициенты модели по (5) и (6) (проводится идентификация параметров модели). Оценивается точность идентификации параметров.
3. По второй половине ряда проводятся поверочные прогнозы, оценивается их точность. Для оценки точности прогнозов целесообразно использовать критерии  $S/\sigma$  или  $S/\sigma_{\Delta}$  [11], суть которых в преимуществе предлагаемого метода над простейшим инерционным прогнозом (соотношение среднеквадратических ошибок их прогнозов).

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОДОПРИТОКОВ ОДНОЙ ИЗ ШАХТ КУЗБАССА

В соответствии с представленной методикой проведены прогнозы для одной из шахт Кузбасса. В качестве исходных данных приняты атмосферные осадки и величина снежного покрова по метеостанции Мыски, которые представлены на рис. 1. Атмосферные осадки, измеряемые на ме-

теостанции, не в полной мере соответствуют входу в модель (осадкам ( $X$ ), поступающим на водосбор), поскольку твердые осадки в виде снега запасаются и поступают на водосбор в процессе снеготаяния, который не контролируется прямыми наблюдениями. Если рассматривать этот процесс, оставаясь в рамках модели (1), то он будет зафиксирован изменением коэффициентов модели, в зависимости от высоты снежного покрова. Поэтому при составлении прогнозов в холодный период года (октябрь–февраль) жидкие осадки принимались равными “0”, в марте – равными измеренным выпавшим осадкам. В период апрель–май за жидкие осадки принимались измеренные осадки за период октябрь–февраль, распределенные между двумя месяцами (апрель и май) пропорционально глубине снежного покрова. В остальные месяцы жидкие осадки принимались равными измеренным (на метеостанции Мыски). При идентификации параметров модели коэффициенты  $k$  и  $\tau$  рассматривались как линейные функции от высоты снежного покрова для учета поступления влаги на водосбор в процессе снеготаяния.

В результате была получена следующая модель:

$$Q_{t_2} = Q_{t_1} + K_1 \times X_{t_1} - K_2 \times Q_{t_1}, \quad (7)$$

где  $Q$  – водоприток в шахту,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $t_2$  – прогнозный месяц;  $t_1$  – предшествующий прогнозному (текущий) месяц;  $K_1 = 0.88504904S + 0.1498$ ;  $K_2 = -0.00592430S + 0.1654$ ;  $S$  – высота снежного покрова на метеостанции Мыски, см;  $X$  – жидкие осадки, поступающие на водосбор, мм.

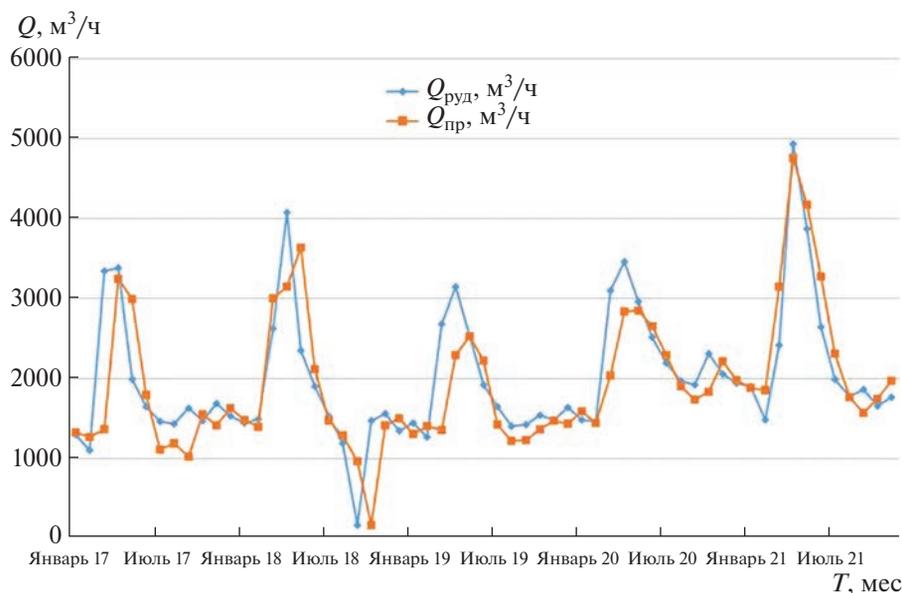


Рис. 2. Прогнозный и фактический гидрографы среднемесячных притоков в шахту.

Прогнозный гидрограф, полученный с помощью этой модели, и фактические данные о водопритоках представлены на рис. 2. Точность модели при идентификации параметров по критерию  $S/\sigma$  [11] составила 0.59, по критерию  $S/\sigma_{\Delta}$  – 0.66. Такой прогноз принято считать “удовлетворительным”.

## ВЫВОДЫ

1. На основании модели водосбора, основанной на модели склонового стока с сосредоточенными параметрами, разработана доступная для применения без специализированного программного обеспечения методика прогнозов водопритоков. Она может быть реализована в любых распространенных редакторах электронных таблиц (MS Excel, OpenOffice Calc и т.п.).

2. Составленные с помощью разработанной методики прогнозы водопритоков для одной из шахт Кузбасса имели “удовлетворительную” точность ( $S/\sigma \approx 0.6$ ).

3. Результаты применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для прогноза сезонных изменений водопритоков совместно с ранее полученными результатами по ее применению для карьеров [1] дают основания утверждать о перспективности применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для прогнозов водопритоков к горным выработкам.

4. Подход к описанию водосбора упрощенными моделями, кроме ряда преимуществ, неизбежно приводит к “размытию” физического смысла коэффициентов (свойств) модели, переходу в область частично-инфинитного моделирования.

Поэтому для оценки возможности (целесообразности) и границ применения представленного метода необходимо более широкое его применение в разных гидрогеологических условиях. Только на основании обобщения эмпирического опыта можно будет сделать более полные соответствующие выводы и обоснования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко К.И., Лесничий Л.И. Прогноз сезонных и годовых изменений водопритоков к карьерам с использованием модели склонового стока с сосредоточенными параметрами // Горный журнал. 2023. № 5. С. 104–108.
2. Коваленко В.В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процесса формирования речного стока. СПб.: РГГМУ, 2004. 197 с.
3. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. СПб. РГГМУ, 2006. 556 с.
4. Котлов С.Н., Шамшев А.А. Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин // ГИАБ. 2019. № 6. С. 45–55.
5. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
6. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румьнин В.Г. Горно-промышленная гидрогеология. М.: Недра, 1989. 287 с.
7. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 2001. 519 с.
8. Норватов Ю.А., Сергутин М.В. Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки Горного института. 2015. С. 89–94.

9. Носков В.А., Бадтиев Б.П., Павлович А.А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ // Горный журнал. 2020. № 2. С. 51–55.
10. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Волков М.А., Гринюк А.П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103–113.
11. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 256 с.
12. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
13. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л.: Недра, 1979. 512 с.

## METHOD OF PREDICTING SEASONAL VARIATIONS IN WATER INFLOW TO UNDERGROUND MINE WORKINGS USING THE WATER CATCHMENT MODEL WITH CONCENTRATED PARAMETERS

L. I. Lesnichii<sup>a,#</sup> and K. I. Gritsenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*St. Petersburg Mining University,  
21st Line 2, V.O., St. Petersburg, 199106 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: Lesnichiy\_LI@pers.spmi.ru*

The authors suggest using the water catchment model with concentrated parameters for prediction of seasonal variation in water inflow to mines. The efficiency of the slope runoff model application was previously shown on the base of three test subjects operating apatite-nepheline ore deposits in the Khibiny massif. The article provides a simple methodology for water inflow prediction which doesn't require any specific software. The example is provided of using this methodology for monthly water inflow prediction based on an underground mine in Kuzbass.

**Keywords:** *water inflow prediction, underground openings, partially infinite modeling, water catchment model*

### REFERENCES

1. Gritsenko, K.I., Lesnichii, L.I. [Forecast of seasonal and annual variation in water inflow to open pit mines using the slope runoff model with concentrated parameters]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 5, pp. 104–108. (in Russian)
2. Kovalenko, V.V. [Partially infinite modeling and forecasting of river runoff]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2004, 197 p. (in Russian)
3. Kovalenko, V.V., Viktorova, N.V., Gaidukova, E.V. [Modeling hydrodynamic processes]. 2nd edition. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2006, 558 p. (in Russian)
4. Kotlov, S.N., Shamshev, A.A. [Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes]. *GIAB*, 2019, no. 6, pp. 45–55. (in Russian)
5. Kuchment, L.S. [River runoff models]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 143 p. (in Russian)
6. Mironenko, V.A., Mol'skii, E.V., Rumynin, V.G. [Mining hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 287 p. (in Russian)
7. Mironenko, V.A. [Dynamics of groundwater]. Moscow, MGU Publ., 2001, 519 p. (in Russian)
8. 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 instituta*, 2015, vol. 212, pp. 89–94. (in Russian)
9. Noskov, V.A., Budtiev, B.P., Pavlovich, A.A. [Risk management in open-pit mining]. *Gornyi zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 51–55. (in Russian)
10. Ponomarenko, M.R., Kutepov, Yu.I., Volkov, M.A., Grinyuk, A.P. [Space methods as a part of comprehensive monitoring of deformations of the Earth's surface at a mining enterprise]. *GIAB*, 2020, no. 12, pp. 103–133. (in Russian)
11. Popov, E.G. [Hydrogeological forecasts]. 2nd edition. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 257 p. (in Russian)
12. Sikan, A.V. [Methods for statistical processing of hydrometeorological information]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2007, 279 p. (in Russian)
13. [Reference book of a hydrogeologist]. 3rd ed. Maksimov, V.M., Ed., Leningrad, Nedra Publ., 1979, vol. 1, 512 p. (in Russian)