

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Лесничий Леонид Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ РЕЧНОГО
СТОКА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Специальность
1.6.21 – геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
географических наук

Санкт-Петербург 2025

Работа выполнена на кафедре инженерной гидрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Научный
руководитель**

Гайдукова Екатерина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной гидрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Официальные
оппоненты**

Кондратьев Сергей Алексеевич,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии».

Котлов Олег Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом Основания, грунтовые и подземные сооружения Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидро-техники имени Б.Е. Веденеева».

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Защита диссертации состоится «29» апреля 2026 г. в 15 ч 00 мин на заседании Диссертационного совета 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета: <https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Я.А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

С каждым годом в России и мире растет объем добычи полезных ископаемых. При разработке месторождений открытым способом одним из наиболее значимых и распространенных техногенных воздействий является изменение режима подземных вод, вследствие дренирования водоносных горизонтов открытыми горными выработками или специальными водопонижающими системами. В радиусе влияния карьера (разреза) изменяется величина подземного питания рек, озер, болот. В то же время, горнодобывающие предприятия часто являются водопользователями рек, на режим которых они оказывают воздействие. Как правило, они осуществляют отведение дренажных (карьерных) вод, сброс которых вызывает изменение режима взвешенных и влекомых наносов, химического состава речных вод. В связи с этим для эффективного водопользования актуальной является задача разработки методов долгосрочных прогнозов речного стока, подверженного влиянию открытых горных работ, в частности, среднемесячного, среднегодового и минимального суточного стока.

Тема исследования соответствует пунктам 9, 18, 23, 24 паспорта специальности 1.6.21 «Геоэкология».

Степень разработанности темы

Исторически сложилось, что задачи оценки воздействия открытых горных выработок на режим подземных вод в целом и изменения подземного питания водоемов и водотоков в частности, преимущественно решаются гидрогеологией (горнопромышленной гидрогеологией, геогидрогеологией).

Методы расчета подземного стока с водосбора (подземного питания водоемов и водотоков, водопритока к горным выработкам) в условиях техногенного воздействия на режим подземных вод достаточно хорошо разработаны. Для этого преимущественно используются численные методы или аналитические решения геофильтрационной модели, основанной на законе Дарси и уравнении неразрывности. В последнее время наиболее широкое распространение получили: программа для гидрогеологических расчетов *ANSDIMAT*, программные комплексы численного геофильтрационного моделирования семейства *ModFlow*, развиваются отечественные аналоги Логос Гидрогеология, *GeRa* и др. Одной из особенностей геофильтрационных моделей (и, в целом, гидрогеологических расчетов) является

ся то, что входом в них служит величина инфильтрационного питания, прямых наблюдений, за изменением которой, на водосборе нет. Поэтому, как правило, прогнозы выдаются при средних и экстремальных значениях величин инфильтрационного питания. Геофильтрационные модели позволяют успешно решать задачи прогноза среднемноголетнего и экстремальных значений подземного питания рек, водопритока к карьерам, и их изменений вследствие техногенных воздействий (например, дренажных мероприятий), но не подходят для решения задачи долгосрочных прогнозов среднемесячных и среднегодовых изменений величины подземного питания рек.

Для решения проблем, связанных с неопределенностью инфильтрационного питания в 2003 году В.М. Шестаковым и С.П. Поздняковым было предложено (в России) научное направление Геогидрогеология, кардинальной естественнонаучной проблемой которой является формирование питания грунтовых вод, а важнейшим вопросом – установление связи между подземными и поверхностными водами.

В рамках геогидрогеологического подхода в настоящее время созданы комплексные (геогидрогеологические) модели водосбора, которые позволяют, в частности, оценить питание водоносных горизонтов (в том числе за счет речного стока), например, модель Московского артезианского бассейна, созданная в МГУ. Но состав и программа наблюдений за режимом природных вод (гидромониторинга) на горнодобывающих предприятиях, как правило, не ориентирована на создание комплексной (геогидрогеологической) модели водосбора, тем более для долгосрочных прогнозов стока. Состав исходной информации, доступной на момент выдачи прогноза, ограничен атмосферными осадками, данными карьерного водоотлива, несколькими гидронаблюдательными скважинами, одним-двумя гидропостами на участках рек, используемых для водопотребления или водоотведения.

По этой же причине, из-за отсутствия исходных данных, затруднительно применять и разработанные в гидрологии суши комплексные модели водосбора. Например, полуэмпирическую концептуальную модель *HBV* и комплексную физико-математическую модель *ECOMAG*. Кроме того, комплексная модель водосбора, созданная для прогноза изменения притока подземных вод с использованием геофильтрационной модели, имеет существенные отличия от той же модели, созданной для прогнозов поверхностного стока.

В долгосрочной перспективе, учитывая тенденции развития гидрологического моделирования, за счет роста количества информации (данных дистанционного зондирования, плотности наземной наблюдательной сети), вероятно, эту проблему удастся решить, и будущее расчетов именно за комплексными (геогидрогеологическими) моделями формирования стока с распределенными параметрами. Но на сегодняшний день нет широко внедренных методов точной оценки фактического среднемесячного инфильтрационного питания на территории России в целом и на горнодобывающих предприятиях в частности. Поэтому, в среднесрочной перспективе, для условий воздействия на речной сток открытых горных работ, целесообразной представляется разработка методов долгосрочных прогнозов, основанных на моделях формирования стока с сосредоточенными параметрами. Особенности их применения довольно хорошо исследованы. Методы, основанные на них, входят в учебные пособия и широко распространены, так, например, в течение нескольких десятилетий унифицированная модель с сосредоточенными параметрами использовалась национальной службой погоды США для ежедневных краткосрочных прогнозов стока более чем в 4000 створах. Но, главное, модели формирования стока с сосредоточенными параметрами – практически единственные из методов долгосрочных прогнозов, которые могут быть в настоящее время обеспечены исходными данными (данными гидромониторинга горнодобывающих предприятий).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка метода долгосрочных прогнозов речного стока для условий техногенного воздействия на него открытых горных работ с использованием модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработан метод долгосрочных прогнозов стока с водосбора в условиях воздействия горных работ, который может быть применим как для речного стока, так и для прогнозов водопритока к карьерам;
- с помощью численного эксперимента проведена оценка эффективности предложенного метода для долгосрочных прогнозов подземного стока с водосбора (водопритока подземных вод к карьере);
- с помощью численного эксперимента проведена оценка эффективности предложенного метода для долгосрочных прогнозов изме-

нения подземного питания рек в условиях воздействия на режим подземных вод открытых горных работ;

– выполнена апробация созданной методики расчета водопритока к открытым горным выработкам на примере карьеров, разрабатывающих месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива;

– выполнена апробация созданной методики для долгосрочных прогнозов среднегодового и минимального суточного в году стока на примере рек месторождения алмазов им. В. Гриба.

Научная новизна

Разработан метод по учету техногенных изменений подземного питания рек, вызванных ведением открытых горных работ.

Разработан метод долгосрочных прогнозов речного стока (среднемесячного, среднегодового и минимального стока меженных периодов) в условиях ведения открытых горных работ.

Разработан метод долгосрочных прогнозов водопритока к открытым горным выработкам.

Теоретическая и практическая значимость работы

Обосновано применение рассматриваемой модели формирования стока с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов речного стока в условиях техногенного воздействия открытых горных работ и различном соотношении в нем подземного, поверхностного и техногенного стока.

Поскольку горнодобывающие предприятия часто являются водопользователями рек, на режим которых они оказывают воздействие, то разработанный метод долгосрочных прогнозов речного стока необходим для рационального использования природных ресурсов и повышения экономической эффективности хозяйственной деятельности горнодобывающих предприятий.

Поскольку долгосрочные прогнозы среднемесячного и среднегодового водопритока к карьерам как подземного, так и общего (подземного и поверхностного) не выполняются, то соответствующие риски, связанные с отсутствием оперативного прогноза величины водопритока, компенсируются, в том числе, дополнительным резервированием необходимого водоподъемного оборудования. Это не может не сказаться на повышении издержек при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Разработанный подход по адаптации гидрологических методов для долгосрочных прогнозов водопритока к карьерам и методика прогнозов среднеме-

сячного и среднегодового водопритока призваны повысить эффективность и безопасность ведения горных работ.

Методология и методы исследования

Для решения поставленной задачи применялись методы математического моделирования и численного эксперимента. В качестве исходных данных для них использовались ряды данных гидрометеорологической информации, данные геологоразведочных работ, наблюдения за характеристиками водного баланса горнообогатительных комплексов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод долгосрочных прогнозов речного стока для условий техногенного воздействия на него горных работ с использованием модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.

2. Метод долгосрочных прогнозов водопритока к открытым горным выработкам.

3. Впервые созданная методика долгосрочных прогнозов водопритока для карьеров, разрабатывающих месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.

4. Впервые созданная методика долгосрочных прогнозов среднегодового и минимального стока зимней межени для рек, подверженных влиянию горных работ на месторождении им. В. Гриба.

Степень достоверности и апробация результатов

В качестве прототипа метода долгосрочных прогнозов стока с водосбора использованы широко известные методы, основанные на модели формирования стока с сосредоточенными параметрами, достоверность которых подтверждена многочисленными предыдущими исследованиями и практикой.

Обоснованность их применения для прогнозов стока рек в условиях изменения подземного питания под воздействием открытых горных работ и водопритока к карьерам подтверждена численным экспериментом и, главное, результатами апробации, оценками точности расчетов (прогнозов) по сравнению с фактическими (наблюдаемыми) величинами.

Основные положения диссертационной работы докладывались на семинарах кафедры инженерной гидрологии Института гидрологии и океанологии РГГМУ. Также, промежуточные результаты работы были представлены очно на конференциях: студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ «Гидрология и океанология-2024» (апрель 2024 г.); 11 Международной практиче-

ской конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (май 2024 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Гидрогеологические, инженерно-геологические и эколого-геологические исследования» (сентябрь 2024 г.); Международной научно-практической конференции по инженерной гидрологии «ИнжГидро-2025» (февраль 2025 г.); Всероссийской конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (ноябрь 1999 г.); Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.В. Рождественского (апрель 2012 г.).

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 1 статья, входящая в журналы, индексируемые в *Web of Science* и *Scopus*, 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы долгосрочных прогнозов среднемесячного, среднегодового и минимального суточного стока с водосбора (прежде всего, стока рек) в условиях техногенного воздействия открытых горных работ. Сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе, в первых трех разделах, рассмотрены основные существующие группы методов расчета водопритока подземных вод к карьерам и подземного питания водоемов и водотоков. Обоснован выбор модели с сосредоточенными параметрами в качестве метода-прототипа для долгосрочных прогнозов стока с водосбора в условиях влияния на режим подземных вод горных работ.

Сформулированы основные требования, которым должна соответствовать разрабатываемая методика, а именно:

- учитывать характерные для горных работ техногенные воздействия на сток с водосбора;
- быть ориентированной на состав и программу гидромониторинга горно-обогатительных комбинатов;
- быть доступной для использования персоналом предприятий;

Отдельно рассмотрена проблема оценки эффективности разрабатываемой методики, связанная с оценкой фактической величины подземного питания рек. Эту задачу предложено решить за счет использования в качестве объекта исследования карьеров – единствен-

ных объектов, на которых прямым методом измеряется величина подземного стока с водосбора (водного бассейна). Поэтому для оценки эффективности разрабатываемого метода необходимо, чтобы он был применим не только для долгосрочных прогнозов речного стока и изменения величины подземного питания рек, но и величины водопритока в карьер.

Наиболее соответствует предъявляемым требованиям к методу-прототипу модель формирования стока вида.

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

где Q – сток с водосбора, м³/ед. времени; k' , τ' – параметры модели; \dot{X} – поступление питания на водосбор, м³/ед. времени; t – время, ед. времени.

Модель (1) за счет пространственного осреднения представляет стокоформирующие процессы, происходящие на водосборе (испарение, инфильтрацию, поверхностный и подземный сток), как функцию трансформации жидких атмосферных осадков на водосборе в целом, генетически не разделяя виды стока. С одной стороны, такой подход позволяет применять эту модель для прогноза стока с водосборов с различным сочетанием его видов: поверхностного, вызванного процессами снеготаяния и осенними дождевыми паводками, притока подземных напорных и безнапорных вод. С другой стороны, при изменении соотношения доли подземного стока меняется физический смысл коэффициентов модели. При преобладании поверхностного стока в общем стоке с водосбора, коэффициенты модели (1) k' , τ' будут иметь смысл коэффициента стока и времени добегания, которые могут зависеть от таких параметров как: залесенность, фазы вегетации, заболоченность и т.п. При преобладании подземного стока, коэффициенты k' , τ' будут определяться фильтрационными и емкостными свойствами водоносных горизонтов (упругая и гравитационная емкость, пористость, водопроницаемость).

Влияние на смысл коэффициентов будут оказывать и техногенные воздействия. В частности, дренажное влияние карьеров. Развитие депрессионной воронки приведет к изменению водопроницаемости и гравитационных запасов. В трехмерной геофильтрационной модели это может быть учтено, а в модели с сосредоточенными параметрами изменение водопроницаемости безнапорных водоносных горизонтов,

будет зафиксировано опосредованно, через изменение коэффициентов модели (k' и τ'). Причем, вероятно, что в случае резкого техногенного снижения уровней, целесообразно говорить о уровнепроводности, аналогом которой в модели (1) может выступать соотношение k'/τ' .

Учесть техногенное воздействие и изменение соотношения видов стока предлагается введением переменных коэффициентов модели. В зависимости от соотношения видов стока может меняться и вид зависимости коэффициентов модели и состав предикторов (дебит карьерного водоотлива, характеристики дренажной системы и т.п.). При таком подходе цель исследования можно уточнить (“сузить”) до решения задачи – насколько изменения коэффициентов модели (1) могут быть надежно предсказаны с использованием имеющихся в распоряжении горнодобывающих предприятий данных (о водопритоке в карьер, расходах воды в дренажной системе, характерных уровнях подземных вод и т.п.).

В четвертом разделе первой главы представлена методика прогноза водопритока к карьерам на основе выбранной модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.

С точки зрения практического применения методов прогноза наибольший интерес представляют те, реализация которых на производстве не требует высокой квалификации персонала и использования специализированного программного обеспечения. Поэтому за основу метода долгосрочных прогнозов была взята модель с сосредоточенными параметрами (1) в численной реализации вида:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t + \frac{\Delta t}{\tau'} k' \dot{X}_t - \frac{\Delta t}{\tau'} Q_t. \quad (2)$$

На каждом временном шаге (Δt) в качестве Q_t задаются фактические (измеренные) значения расходов воды. Шаг расчета равен заблаговременности прогноза. В этом случае задача идентификации параметров может быть выполнена с помощью метода наименьших квадратов. Решение можно получить как для случая, когда $k' = \text{const}$ и $\tau' = \text{const}$, так и для ряда случаев, когда они линейно зависят от известных, измеренных параметров, характеризующих техногенное воздействие, например, объема откачки дренажных вод из карьера, его глубины, уровней подземных вод и т.п. В работе рассмотрены

случаи: $\frac{k'}{\tau'} = aY_1 + b$, $k' = aY_1 + b$, $\frac{\Delta t}{\tau'} = cY_2 + d$, и др., где Y_1 и Y_2 – предикторы (высота снежного покрова, температура воздуха, расходы воды в дренажной системе, глубина карьера); a , b , c , d – параметры линейной регрессии. Выбор именно этих зависимостей обусловлен с одной стороны тем, что они соответствовали возможным (предполагаемым) закономерностям, с другой стороны тем, что для них можно создать простой, не требующий специального программного обеспечения алгоритм расчетов (прогнозов) среднемесячных и среднегодовых значений водопритока.

Во второй главе приведено описание численного эксперимента по сравнению долгосрочных прогнозов водопритока в карьер и подземного питания рек, выполненных с помощью выбранной модели формирования стока с сосредоточенными параметрами и геофильтрационной модели.

Основная цель эксперимента оценить насколько модель (1) уступает в точности прогнозов подземного стока (притока в карьер подземных вод, подземного питание рек) в условиях ведения горных работ геофильтрационной модели. Насколько введение предложенных зависимостей для коэффициентов модели, позволить повысить оправдываемость прогнозов.

Численный эксперимент состоял из следующих основных этапов:

- выбран объект исследования;
- для водного бассейна карьера создана геофильтрационная модель;
- рассчитан водоприток в карьер и подземное питание рек при различных вариантах техногенных воздействий (откачки из дренажного контура, глубины карьера);
- полученные расчетные ряды были приняты за фактические и спрогнозированы с помощью модели (1);
- выполнена оценка оправдываемости прогнозов.

В качестве объекта исследования выбран карьер, с помощью которого разрабатывается месторождение алмазов им. В. Гриба. Форма карьера (трубки В. Гриба) и гидрогеологические условия таковы, что доля подземного притока много больше поверхностного, как за счет перехвата поверхностного стока нагорными канавами, так и за счет значительной абсолютной величины притока подземных вод. В карьере выполняются надежные наблюдения за среднесуточным водопритоком, а на площади водосбора (водного бассейна) проводятся

регулярные наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод.

Для района выбранного карьера, вскрывшего месторождения алмазов им. В. Гриба, была создана геолого-структурная модель. Типовой геологический разрез рассматриваемой территории представлен на рис. 1.

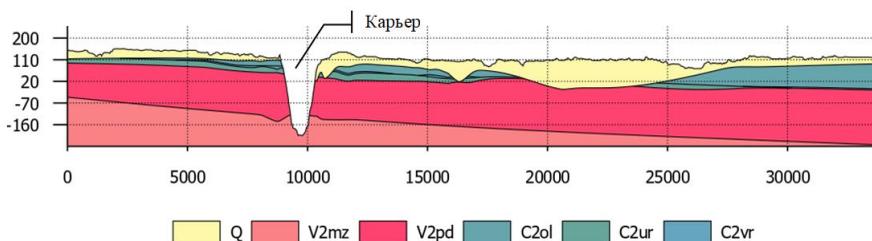


Рис. 1. Типовой геологический разрез рассматриваемой территории.

С учетом геолого-структурной модели разработана геофильтрационная модель для площади водосбора (водного бассейна) карьера. Она создана в программном комплексе Нимфа (Логос Гидрогеология), которая использует неструктурированную сетку с поддержкой выклинивания. В модели выделено 6 основных слоев – водоносных и водоупорных горизонтов, которые полностью совпадают с выделенными геологическими подразделениями. Размер сетки в радиусе 5–9 км от карьера 20 м, на больших удалениях 1 км.

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

Таблица 1

Принятые фильтрационные параметры для гидрогеологических подразделений

№ слоя	Гидрогеологическое подразделение	Коэффициент фильтрации по горизонтали ($k_{гг}$), м/сут	Коэффициент фильтрации по вертикали ($k_{зг}$), м/сут	Коэффициент упругости, 1/м
1	Q	30	3	0,0001
2	C _{2ol}	25	0,1	0,0001
3	C _{2vr}	0,1	0,005	0,0001
4	C _{2ur}	2,5	0,5	0,0001
5	V _{2pd}	1,2	0,1	0,00001
6	V _{2mz}	0,002	0,0002	0,00001

На основе созданной базовой модели были разработаны различные ее варианты – тестовые модели, предназначенные для расчета (прогноза) водопритока к карьере при заданных значениях инфильтрационного питания и различном техногенном воздействии на режим подземных вод. Были смоделированы два карьера. Первым были вскрыты только четвертичные отложения, вторым – отложения венда. Для каждого из карьеров были смоделированы различные внешние воздействия (различный режим работы водопонижающего контура и величина инфильтрационного питания). Выполнены соответствующие расчеты среднемесячных и среднегодовых значений водопритока к карьере при заданных значениях инфильтрационного питания и различных режимах водопонижающего контура. Для тех же самых условий (принятых в геофильтрационной модели) выданы прогнозы водопритока к карьере с помощью методики, основанной на модели с сосредоточенными параметрами (1). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица оправдываемости прогнозов по критерию S/σ для разработанных вариантов модели формирования стока с сосредоточенными параметрами

Варианты модели	Карьер вскрыл четвертичные отложения	Карьер вскрыл вендские отложения
1. Прогноз среднегодового притока		
при постоянных коэффициентах	0,67	0,41
при переменных коэффициентах	0,28	0,16
2. Прогноз среднемесячного притока		
2.1. При неработающем контуре водопонижающих скважин (ВПС) при постоянных коэффициентах	0,40	0,21
при переменных коэффициентах	0,16	0,14
2.2. Работает контур ВПС при постоянных коэффициентах	0,24	0,10
при переменных коэффициентах	0,21	0,03

В целом из анализа результатов численного эксперимента можно сделать следующие выводы:

– значения водопритока в карьер, рассчитанные с помощью геофильтрационной модели, могут быть спрогнозированы с помощью

модели формирования стока с сосредоточенными параметрами с переменными коэффициентами с высокой точностью (оправдываемостью).

– Оправдываемость прогнозов среднегодовых значений водопритока с заблаговременностью один год при использовании моделей формирования стока с постоянными коэффициентами можно отнести к категории «хороших» и «удовлетворительных» ($S/\sigma=0,41\div 0,67$). При использовании переменного коэффициента (k'), линейно зависящего от величины водопритока, оправдываемость прогноза возрастает более чем в два раза ($S/\sigma=0,16\div 0,28$).

– Оправдываемость прогнозов среднемесячных значений водопритока с заблаговременностью один месяц при использовании моделей формирования стока с постоянными коэффициентами можно отнести к категории «хороших» ($S/\sigma=0,10\div 0,40$). Применение переменных коэффициентов позволило увеличить оправдываемость прогнозов в 1,5–3 раза ($S/\sigma=0,03\div 0,21$).

– Оправдываемость прогнозов для карьера, вскрывшего напорные падуновские отложения, в целом выше, чем для карьера, вскрывшего безнапорные четвертичные отложения. Связано это, прежде всего с изменением водопроницаемости безнапорного водоносного горизонта при изменении уровней.

В целом можно сделать вывод, что применение модели с сосредоточенными параметрами (1) для прогнозов подземного стока оправдано для представленного, довольно широко распространенного сочетания гидрогеологических условий. Но границы применения (целесообразность применения) модели (1) зависит от сочетания геолого-гидрогеологических и техногенных условий. В каждом конкретном случае (для каждого конкретного карьера) целесообразность ее применения должна быть обоснована.

Отдельно выделен и описан численный эксперимент по долгосрочному прогнозу подземного питания р. Волчьей.

С помощью геофильтрационной модели, описывающей фактические гидрогеологические условия района месторождения им. В. Гриба, были выполнены расчеты среднегодовых значений подземного питания речного стока. Полученные значения были спрогнозированы с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Оправдываемость прогнозов по критерию S/σ составила 0,06. Таким образом, можно сделать вывод, что модель формирования

стока с сосредоточенными параметрами с переменными коэффициентами позволяет, по крайней мере, для гидролого-гидрогеологических условий района месторождения им. В. Гриба, прогнозировать величину подземного питания рек.

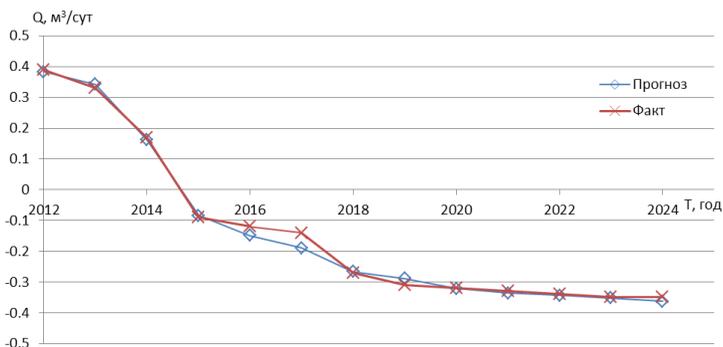


Рис. 2. Прогнозные и фактические значения подземного питания р. Волчьей на участке от г/п-1 до г/п-2.

В третьей главе проведена апробация предлагаемой методики прогнозов для карьеров. В качестве объектов исследования выбраны Коашвинский, Ньоркпахкский и Саамский карьеры месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, характеризующиеся различным соотношением подземного и поверхностного стока в общем водопритоке к ним. Их краткая характеристика дана в первом разделе третьей главы. Наибольшая доля поверхностного стока в притоке к Саамскому карьере, подземного – к Коашвинскому.

Для этих карьеров по разработанному подходу (раздел 1) была создана методика прогнозов. Представлены расчеты (прогнозы) среднегодового и среднемесячного водопритока.

В качестве исходных данных были использованы, соответственно, годовые или среднемесячные величины водопритока к карьерам (водоотлива) и данные о суммах осадков и средней температуре по ГЛУ «Центральный».

При прогнозах среднемесячного водопритока, поскольку данных в оперативном доступе о процессах весеннего снеготаяния нет, влияние снегонакопления и снеготаяния на поступление жидких осадков на водосбор учитывалось следующим образом: эффективные осадки

(питание) за период с октября по март включительно принимались равными нулю. Сумма выпавших за этот период осадков в равных долях добавлялась к осадкам, выпавшим в апреле и мае (снеготаяние происходило равномерно в апреле и мае).

При использовании переменных коэффициентов модели, находилась их взаимосвязь от величины водоотлива или атмосферных осадков. Результаты расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

Сводная таблица оправдываемости прогнозов по критерию S/σ для разработанных вариантов модели формирования стока с сосредоточенными параметрами

Карьер	Саамский	Коашвинский	Ньюркапхский
Прогноз среднегодового притока			
Модель с постоянными коэффициентами	1,04	0,64	0,65
Модель с переменными коэффициентами	0,40	0,33	0,45
Прогноз среднемесячного притока			
Модель с постоянными коэффициентами	0,65	0,33	0,56
Модель с переменными коэффициентами	0,50	0,31	0,50

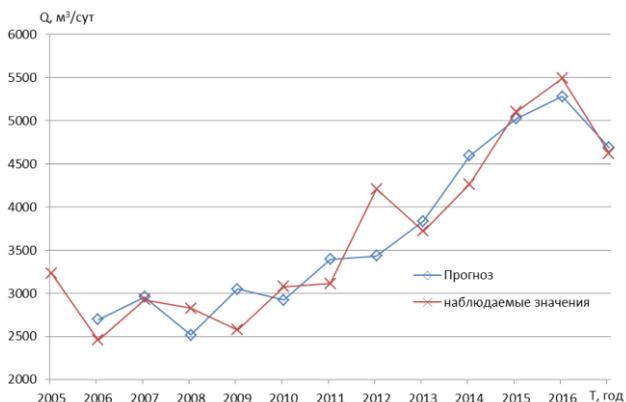


Рис. 3. Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к Коашвинскому карьеру при переменных коэффициентах.

Результаты расчетов для реальных объектов в целом подтвердили результаты численного эксперимента (глава 2). С помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами и переменными коэффициентами создана методика долгосрочных прогнозов (среднегодовых и среднемесячных значений) водопритока к карьерам, месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, характеризующиеся различным соотношением подземного и поверхностного стока, с заблаговременностью один месяц и год соответственно.

Необходимо отметить, что результата удалось достичь, используя ограниченный набор исходных данных, полученный по неспециализированной (для задач гидропрогнозов) сети гидромониторинга горно-обогатительного комплекса. Следует ожидать, что при использовании дополнительных данных, например дистанционного зондирования Земли (электронный ресурс Финского метеорологического института *GlobSnow*) и небольшого количества тарировочных наземных наблюдений за высотой снежного покрова и величиной водозапаса в нем и т.п., точность прогнозов можно улучшить.

В четвертой главе проведена апробация предлагаемой методики для прогнозов среднего и минимального стока зимней межени рек, подверженных влиянию ГОКа им. В. Гриба.

В первом разделе проведен анализ результатов режимных гидрологических наблюдений за 2011–2024 гг. Описаны выявленные техногенные изменения в стоке рек.

Во втором разделе для рек Кукомка и Волчья составлены прогнозы годового и минимального суточного стока зимней межени с заблаговременностью 1 год. Коэффициент k' в модели (1) принимался переменным, линейно зависящим от величины откачки из карьера или дебита контура водопонижающих скважин. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Таблица 4

Сводная таблица оправдываемости долгосрочных прогнозов по критерию S/σ для рек Кукомка и Волчья

Вид модели	р. Кукомка	р. Волчья
Прогноз среднегодового стока		
Модель с постоянными коэффициентами	0,86	0,74
Модель с переменными коэффициентами	0,70	0,57
Прогноз минимального стока зимней межени		

Вид модели	р. Кукомка	р. Волчья
Модель с постоянными коэффициентами	0,64	0,62
Модель с переменными коэффициентами	0,42	0,40

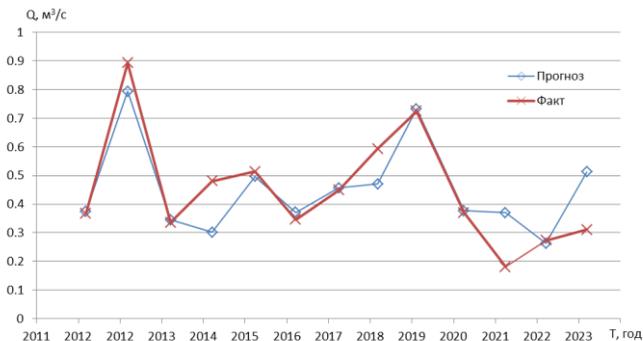


Рис. 4. Прогнозные и фактические значения минимального стока зимней межени р. Волчьей на г/п-1.

Из представленной таблицы и рисунка видно, что использование переменных коэффициентов рассматриваемой модели позволило повысить оправдываемость прогнозов среднегодового и минимального суточного стока зимней межени.

Прогнозы минимального стока зимней межени для рек Волчьей и Кукомки можно отнести к категории «хороших», годового стока р. Волчьей и р. Кукомки к категории «удовлетворительных». Относительно низкая точность прогнозов годового стока, связана с низкой точностью оценки его фактических значений, поскольку на рассматриваемых реках расходы измеряются довольно часто 30–50 раз год, но отсутствуют данные наблюдений за уровнями воды в остальные дни (в которые расходы воды не измерялись). Соответственно, нет возможности восстановления суточного стока.

В целом, можно заключить, что с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами и переменными коэффициентами создана надежная методика долгосрочных прогнозов (среднегодового и минимального суточного стока зимней межени) для рек, подверженных влиянию горных работ в районе Зимнего берега Белого моря.

Заключение

Для разработки метода прогнозов речного стока в условиях воздействия на режим подземных горных работ в качестве метода прототипа была использована модель формирования стока с сосредоточенными параметрами. Для учета техногенных воздействий и различного соотношения в речном стоке подземной и поверхностной составляющих был использован подход, предполагающий представление коэффициентов модели как функций от известных характеристик техногенных и природных воздействий на режим подземных вод (водопритока в карьер, дебита водопонижающих скважин и т.п.). Для оценки эффективности этого подхода были проведены следующие исследования:

- проведен численный эксперимент по сравнению предлагаемой методики с геофильтрационной моделью для долгосрочных прогнозов водопритока к карьере и подземного питания рек в радиусе его влияния на режим подземных вод;

- проведена апробация предлагаемой методики на примере Коашвинского, Ньюркпахкского и Саамского карьеров месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива;

- проведена апробация предлагаемой методики для прогнозов среднегодового и минимального стока зимней межени на примере рек, подверженных влиянию открытых горных работ на месторождении алмазов им. В. Гриба;

Результаты численного эксперимента по сравнению модели формирования стока с сосредоточенными параметрами и геофильтрационной модели показывают, что, по крайней мере, для гидрогеологических условий Зимнего берега Белого моря рассматриваемая модель формирования стока с сосредоточенными параметрами позволяет описать подземный сток с водосбора (водоприток к карьерам, величину подземного питания рек) практически с такой же точностью, как и геофильтрационная модель. Это утверждение справедливо как при отсутствии техногенного воздействия, так и в условиях влияния дренажной системы карьера на режим подземных вод.

С помощью предлагаемого метода, основанного на модели формирования стока с сосредоточенными параметрами и переменными коэффициентами, созданы:

- методика долгосрочных прогнозов (среднегодовых и среднемесячных значений) водопритока к карьерам, месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива с заблаговременностью один месяц и год соответственно;

– методика долгосрочных прогнозов (среднегодового и минимального суточного стока зимней межени с заблаговременностью один год) для рек, подверженных влиянию горных работ в районе Зимнего берега Белого моря.

Результаты апробации разработанных методик долгосрочных прогнозов свидетельствуют о целесообразности их применения для прогнозов

– среднемесячного и годового водопритока к открытым горным выработкам месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива;

– среднегодового и минимального речного стока зимней межени для района Зимнего берега Белого моря.

Основные публикации по теме диссертации

В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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.
2. Лесничий Л. И., Гриценко К. И. Метод прогноза сезонных изменений водопритока к подземным горным выработкам на основе модели водосбора с сосредоточенными параметрами // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 6. – С. 79–83.
3. Лесничий Л. И., Гриценко К. И. Прогноз сезонных и годовых изменений водопритоков к карьерам с использованием модели склонового стока со сосредоточенными параметрами // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 104–108.
4. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Викторова Н. В., Громова М. Н., Лесничий Л. И. Методика оценки долгосрочных изменений вероятностных характеристик минимального стока при антропогенном изменении климата // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2010. – Т. 152, № 1. – С. 253–260.

Материалы конференций

5. Лесничий Л. И., Гайдукова Е. В., Гриценко К. И. Перспективы применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов водопритока к карьерам // Гидрогеологические, инженерно-геологические и эколого-геологические исследования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 27–28 сентября 2024 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2025. – С. 26–30.
6. Лесничий Л. И., Гайдукова Е. В. Влияние напорных и безнапорных подземных вод на оправдываемость прогнозов среднемесячного стока с водосбора с помощью модели с сосредоточенными параметрами // Инженерная гидрология-2025: Коллективная монография по материалам международной конференции. – Казань: ООО «Бук», 2025. – С. 36–40.
7. Лесничий Л. И., Гайдукова Е. В. Оценка применимости модели с сосредоточенными параметрами для моделирования среднемесячного стока воды с большой долей подземной составляющей для условий Зимнего берега Белого моря // Гидрология и океанология-2024: Сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ, Санкт-Петербург, 19 апреля 2024 года. – Казань: ООО «Бук», 2024. – С. 104–109.
8. Коваленко В. В., Шевнина Е. В., Хаустов В. А. Лесничий Л. И. и др. Системное моделирование стохастических процессов водообмена на водосборе озера Ильмень для целей прогноза месячного притока к Волховской ГЭС // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей, Москва, 22–26 ноября 1999 года. – Москва: Институт водных проблем Российской академии наук, 1999. – С. 47–48.
9. В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова, Лесничий Л. И. и др. Сценарная оценка долгосрочных изменений максимального стока весеннего половодья в Арктическом регионе России на основе стохастической модели формирования многолетнего стока // Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока: труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.В. Рождественского, Москва, 10–12 апреля 2012 года / Институт водных проблем РАН, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Государственный гидрологический институт, Фе-

деральное агентство водных ресурсов МПРиЭ. – Москва, 2012. – С. 100–105.

Патенты

10. Патент № 2584711 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/32. способ рекультивации откосов солеотвалов: № 2014147785/03: заявл. 26.11.2014; опубл. 20.05.2016 / В. В. Сланевский, В. П. Копшталева, Л. И. Лесничий, А. А. Дехтярев; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).