

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК: 556.3.06: 556.5.06: 622.51

Лесничий Леонид Игоревич

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

Специальность 1.6.21–Геоэкология

Диссертация
На соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель
к.т.н. Гайдукова Е.В.

Санкт-Петербург 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Разработка метода прогноза речного стока в условиях ведения горных работ.....	11
1.1. Методы прогноза водопритока к карьерам из насыщенной зоны. Геофильтрационная модель.	12
1.2. Гидрологические методы прогнозов подземного стока с водосбора	15
1.3. Метод прототип, уточнение задачи исследования	22
1.4. Методика прогноза водопритока к карьерам на основе модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.....	26
1.4.1 Определение параметров модели	27
1.4.2 Методика прогноза водопритока к карьерам на основе модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.....	37
2. Численный эксперимент по сравнению модели формирования стока с сосредоточенными параметрами с геофильтрационной моделью.....	39
2.1 Тестовая геофильтрационная модель на примере карьерного поля трубы им. В. Гриба	41
2.1.1. Краткие сведения о месторождении имени В. Гриба.....	41
2.1.2 Геолого-структурная модель.....	43
2.1.3 Параметры модели, граничные и начальные условия.....	46
2.1.4 Калибровка геофильтрационной модели.....	47
2.1.5 Тестовая численная геофильтрационная модель	56
2.1.6 Прогноз водопритока к карьеру с помощью тестовой численной геофильтрационной модели.	58
2.2 Модель формирования стока с сосредоточенными параметрами для карьерного поля трубы им. В. Гриба	60
2.2.1 Прогноз годового водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.....	61
2.2.2 Прогноз среднемесячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами для условий без снегонакопления.....	64
2.2.3 Прогноз месячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами при осадках заданных с учетом снегонакопления.....	67
2.2.4 Прогноз среднемесячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами при действующем контуре водопонижающих скважин.....	71

2.3. Сравнение и анализ результатов численного эксперимента водопритока к карьеру.....	75
2.4 Прогноз подземного питания р. Волчья.....	78
3. Апробация модели формирования стока с сосредоточенными параметрами. Расчет притока к действующим горным выработкам	80
3.1 Краткое описание выбранных карьеров, разрабатывающих месторождение апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.....	80
3.2. Расчет годового притока к карьерам.....	82
3.3. Расчет среднемесячного притока к карьерам.....	88
4. Прогноз среднегодового и минимального стока для рек, подверженных влиянию ГОКа им. В. Гриба	93
4. 1 Влияние горных работ на речной сток.....	93
4.1.1 Гидрологический режим на карьерном поле в бассейне р. Мегры.....	94
4.1.2 Гидрологический режим на карьерном поле в бассейне р. Сояна	102
4.2 Прогноз годового минимального стока для рр. Волчей и Кукомки	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
Приложение А	113
Приложение Б	116
Приложение В.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

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 геофiltрационной модели, основанной на законе Дарси и уравнении неразрывности. В последнее время наиболее широкое распространение получили: программа для гидрогеологических расчетов *ANSDIMAT*, программные комплексы численного геофiltрационного моделирования семейства *ModFlow*, развиваются отечественные аналоги Логос Гидрогеология, *GeRa* и др. Одной из особенностей геофiltрационных моделей (и, в целом, гидрогеологических расчетов) является 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. Геофiltрационные 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 карьеру);
- с помощью численного эксперимента проведена оценка эффективности предложенного метода для долгосрочных прогнозов изменения 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, компенсируется, в том числе, дополнительным резервированием необходимого водоподъемного оборудования. Это не может не сказаться на повышении издержек при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Разработанные подход по адаптации гидрологических методов для долгосрочных прогнозов водопритока к карьерам и методика прогнозов среднемесячного 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 горно-обогатительных 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 сообщества Института гидрологии и океанологии РГГМУ «Гидрология и океанология-2024»

(апрель 2024 г.); 11 Международной практической 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.

1. Разработка метода прогноза речного стока в условиях ведения горных работ

Одним из наиболее значимых техногенных воздействий при ведении открытых горных работ на речной сток является изменение величины его подземного питания. Поэтому, для того, чтобы разработать метод долгосрочных прогнозов речного стока в этих условиях необходимо, прежде всего, иметь возможность прямой оценки величины подземного стока из дренируемых рекой водоносных горизонтов (комплексов) и его изменений под действием техногенных факторов. В ряде случаев подземный сток с водосбора (водного бассейна) может быть прямо измерен, например, в определенных гидрологических условиях речной сток зимней межени, может практически полностью быть сформирован подземным питанием, также речной сток может быть обусловлен преимущественно подземным питанием в районах с засушливым климатом и т.п. Но для большинства рек прямых измерений, позволяющих оценить среднемесячное подземное питание во все сезоны года, нет. Регулярные наблюдения за стоком подземных вод с водного бассейна широко распространены только в горных выработках. Поэтому в качестве метода-прототипа целесообразно использованы те методы, которые могут быть применены не только для прогнозов речного стока, но и водопритока к карьерам (разрезам). Это позволит оценить эффективность предлагаемых методов в части прогноза изменений подземной составляющей стока с водосбора. В гидрогеологии это методы расчета и прогноза водопритока к карьерам (разрезам) и изменения величины инфильтрационного питания поверхностных водоемов и водотоков [15, 16, 30]. В гидрологии это, прежде всего, комплексные модели водосбора и методы прогноза минимального меженного стока (для условий, когда минимальный сток определен исключительно подземным питанием) [2, 44].

1.1. Методы прогноза водопритока к карьерам из насыщенной зоны. Геофiltрационная модель.

Для карьеров (разрезов), которыми разрабатываются крупные месторождения полезных ископаемых, в большинстве случаев характерно преобладание доли подземного стока в общем притоке к ним, в том числе за счет создания элементов дренажной системы, перехватывающих поверхностный сток. Поэтому, задачу прогноза водопритока к карьеру на практике, в большинстве случаев можно сузить до прогнозов притока подземных вод из насыщенной зоны гидрогеологического разреза.

Для расчета водопритока к открытым горным выработкам в гидрогеологии в большинстве случаев используются методы, основанные на геофiltрационной модели [16]. Традиционно широко используются аналитические формулы [25, 26, 30], которые являются частными случаями (решениями для схематизированных гидрогеологических условий) геофiltрационной модели, общий вид которой, для плановой фильтрации в изолированном напорном пласте, представлен уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1.1)$$

где H – напор, μ^* – коэффициент упругой емкости породы, T_x , T_y – коэффициенты водопроводимости по координатным осям x , y ; t – время.

В последние три десятка лет все более распространенной практикой становится расчет водопритоков с использованием методов математического моделирования (например, с использованием программных комплексов семейства ModFlow [40]). Их применение обусловлено не только точностью расчетов, но и возросшей доступностью этих методов и универсальностью их применения для разных геолого-гидрогеологических условий. Общеизвестна эффективность геофiltрационных моделей для расчетов средних и экстремальных значений водопритоков (рассчитанных при заданных максимальных и минимальных сценарных природных и техногенных внешних воздействиях). Она подтверждена

практикой и рекомендациями соответствующих СП [27]. Но в литературе не описаны факты широкого применения геофильтрационной модели для выдачи регулярных долгосрочных прогнозов изменения среднемесячного и годового подземного питания рек и водопритока к открытым горным выработкам.

Применение математических моделей для разработки и выдачи таких прогнозов связано с рядом сложностей [11, 35]. Вызваны они, в первую очередь, тем, что в принятой для описания движения подземных вод геофильтрационной модели в качестве внешнего воздействия (верхнего граничного условия) задается инфильтрационное питание. Среднемноголетние, максимальные и минимальные значения величины инфильтрационного питания можно получить методом водного баланса, в том числе с помощью построенных региональных карт слоя стока или коэффициента подземного стока, например [23, 28, 29]. Среднемесячные величины инфильтрационного питания – результат нестационарных процессов влагопереноса в ненасыщенной зоне, наблюдения за которыми, за исключением небольшого числа специальных полигонов, на территории России отсутствуют. Поэтому отсутствуют и точные оперативные (регулярные, с заблаговременностью не менее одного месяца) прогнозы среднемесячных величин инфильтрационного питания. Как следствие, прогнозировать сезонные изменения водопритоков с помощью только геофильтрационной модели можно лишь в очень ограниченном числе случаев (при отсутствии зоны аэрации или наличии специальных наблюдений за влагопереносом в ней).

Для решения проблем, связанных с неопределенностью инфильтрационного питания В.М. Шестаковым и С.П. Поздняковым было предложено в 2003 году (в России) научное направление Геогидрогеология [35], кардинальной естественнонаучной проблемой которой является формирование питания грунтовых вод, а важнейшим вопросом – установление связи между подземными и поверхностными водами. Фактически, геогидрогеология находится на стыке гидрологии суши и гидрогеологии, являясь разделом гидрологии.

В рамках геогидрогеологического подхода в настоящее время созданы комплексные (геогидрогеологические) модели формирования стока с водосбора и методы, которые позволяют, в частности, оценить питание водоносных горизонтов (в том числе – за счет речного стока) [3, 4], например, модель Московского артезианского бассейна, созданная в МГУ.

Известно много проблем теоретического характера, которые затрудняют создание подобных комплексных моделей, например проблемастыковки численных моделей с распределенными параметрами подземного и поверхностного стока, связанная с различной скоростью исследуемых процессов [35]. Но в данной работе их можно не рассматривать. Главным ограничением в широком применении комплексных моделей является необходимость наличия соответствующих исходных данных для моделирования. Например, для прогноза стока с водосбора (водопритока к карьеру), вызванного процессами снеготаяния, такая комплексная модель должна включать в себя: модель таяния снега, в зависимости от погодных условий; модель поверхностного стока и поступления питания в зону аэрации; модель влагопереноса в ненасыщенной зоне и геофильтрационную модель.

Следует учесть, что состав и программа гидромониторинга на горнодобывающих предприятиях, как правило, не ориентированы на создание комплексной (геогидрогеологической) модели водосбора, тем более для долгосрочных прогнозов среднемесячного и среднегодового стока. Состав исходной информации, доступной на момент выдачи прогноза, ограничен данными ближайшей метеостанции, сведениями о карьерном водоотливе, данными по нескольким гидронаблюдательным скважинам и одном – двум гидропостам на участках рек, используемых для водопотребления или водоотведения. Поэтому созданные на сегодняшний день региональные геогидрогеологические модели позволили повысить точность гидрогеологических расчетов за счет районирования величины инфильтрационного питания, но не решили задачу долгосрочных прогнозов подземного питания рек и водопритока к

карьерам. На сегодняшний день гидрогеологических методов долгосрочных прогнозов стока с водосбора (среднемесячных и среднегодовых величин с заблаговременностью месяц и год соответственно), которые могли бы быть применены для значительного количества карьеров (разрезов), не создано.

1.2. Гидрологические методы прогнозов подземного стока с водосбора

Не смотря на то, что прогнозы подземного стока с водосбора (подземного питания рек, водопритока к карьерам и т.п.) относятся к области гидрогеологии, тем не менее, методы для них разрабатываются и в гидрологии суши.

Во-первых, в гидрологии суши, также как и в гидрогеологии, развивается направление, посвященное созданию комплексных моделей водосбора, с той лишь разницей, что оно не выделено в отдельное научное направление, т.к. исторически расчеты и прогнозы речного стока с водосбора часто связывались с расчетом водного баланса. Во-вторых, прогнозы меженного стока, в условиях, когда он сформирован преимущественно подземным питанием, фактически являются прогнозами подземного питания. В первом случае можно говорить о прямых прогнозах подземного стока, во втором – о косвенных.

Можно выделить три группы методов, которые могут быть применимы для долгосрочных прогнозов подземного стока с водосбора. Первый – это создание комплексной модели формирования стока с водосбора, учитывающей все основные стокоформирующие процессы на нем [7, 35]. Второй подход – это методы прогноза для преобладающих видов стока (меженного стока, стока весеннего половодья и т.п.). Третий – применение моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами, рассматривающих водосбор как единое целое, не разделяющих сток по его генезису.

Поскольку цель исследования – разработать общий подход или методику прогнозов, которые были бы применимы для значительного числа горно-обогатительных предприятий и могли бы применяться техническим персоналом на производстве, то из рассмотрения следует исключить эмпирические методы,

основанные на индивидуальном для каждого объекта поиске прогнозных зависимостей и остановится только на концептуальных и физико-математических моделях. Из них, в свою очередь, следует обратить внимание на те, которые в том или ином виде позволяют прогнозировать сток с водосбора подземных вод (подземное питание рек, озер, водоприток к карьерам).

Отдельно необходимо отметить стохастические модели формирования стока [1, 7]. Из них можно выделить несколько видов, например: динамико-стохастическую модель водного баланса водосбора [33] или модель [8, 45], ядром которой служит динамическая модель с сосредоточенными параметрами. Но в представленном исследовании они не рассматриваются, поскольку, во-первых, при использовании стохастических моделей, прежде всего, должны быть учтены (исключены) неслучайные техногенные влияния. Соответственно, должны быть разработаны методы динамических прогнозов техногенных изменений стока. Во-вторых, программы гидрометеорологических наблюдений, осуществляемые горнодобывающими предприятиями, как правило, составлены только для выполнения требований соответствующих нормативных документов (например, [27]), которые не ориентированы на составления стохастических моделей формирования стока. Ряды наблюдений относительно короткие и часто неоднородные.

Группа методов, предназначенных для прогноза преобладающих видов стока, представляется мало перспективной в качестве метода-прототипа. Показать это можно на примере метода долгосрочных прогнозов к водохранилищам на основе учета закономерностей истощения запасов воды в речных бассейнах в период межени [2]. На первый взгляд этот метод разработан специально для условий межени и преобладания подземного стока, поэтому он должен был бы подходить в качестве метода-прототипа, но это не так. Его основа это уравнение истощения:

$$Q(t) = (Q_0 - q)e^{-at} + q, \quad (1.2)$$

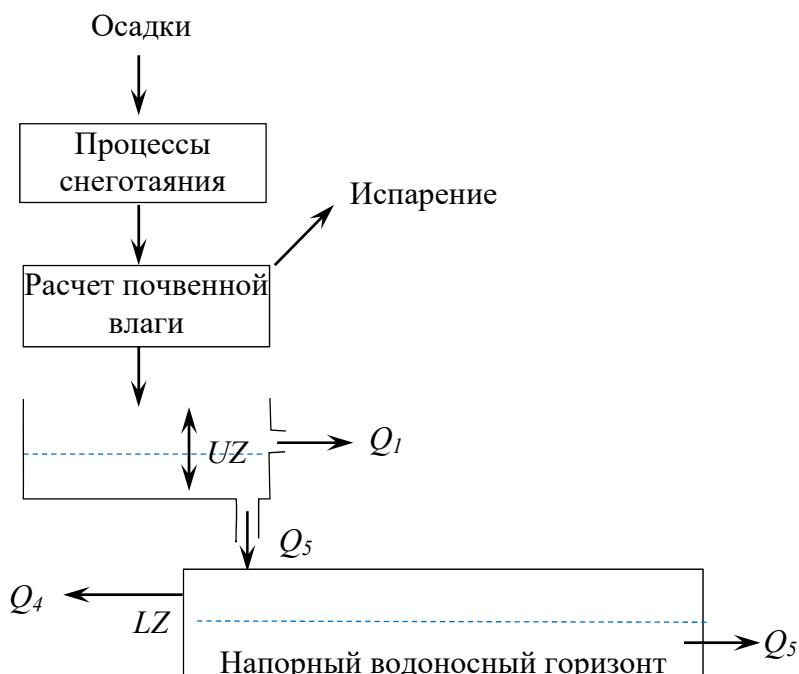
где Q_0 – расход воды в начале межени, $\text{м}^3/\text{ед. времени}$; a, q – постоянные для данного бассейна параметры модели; t – время от начального момента t_0 .

Из (1.2) видно, что суть метода в том, что для прогноза используется известная экспоненциальная закономерность истощения запасов подземных вод при отсутствии их восполнения в период межени. Т.е. не прогнозируется изменение стока подземных вод, а используется одна из известных особенностей их режима для прогноза притока к водохранилищу. Суть всех подобных методов – наличие определенных допущений, которые могут быть приняты для условий характерного периода: отсутствие испарения в период половодья, инфильтрации в период межени и т.п.

Частично такой подход может быть использован для прогноза подземного питания рек или притока к некоторым карьерам в периоды сработки запасов подземных вод, например при преобладающем влиянии на режим подземных вод дренажных мероприятий или при длительных меженных периодах (в режиме подземных вод). Но такой подход может быть только вспомогательным, т.к. главная задача прогноза подземного стока с водосбора в периоды его сезонных или техногенных изменений останется нерешенной. Его использование, скорее всего, лишь усложнит выдачу прогнозов. Поэтому использование методов, предназначенных для прогноза преобладающих видов стока, в качестве метода-прототипа нецелесообразно, в этом качестве необходимо обратить внимание на комплексные модели формирования стока.

Примером комплексной модели формирования стока могут служить полуэмпирическая концептуальная модель *HBV* [39] и комплексная физико-математическая модель с полураспределенными параметрами *ECOMAG* [17], основанная на уравнениях, представленных в [12, 17]. Модель *HBV* представляет определенный интерес в качестве метода-прототипа, поскольку еще в 1983 году опубликованы результаты применения этой модели для моделирования реакции подземных вод [37]. Общая схема блоков модели представлена на рисунке 1.1. В целом, по результатам работы авторы делают вывод о возможности применения

модели *HBV* для прогноза подземного стока с водосбора. Но, в тоже время утверждают, что если моделировать неограниченный в плане пласт, то физическая необоснованность параметров модели и множество вариантов ее калибровки (сочетания значений коэффициентов, которые обеспечивают соответствие модельных и наблюдаемых значений), могут не позволить выдавать точные прогнозы [37]. Проблема эквифинальности, вероятно, может стать почти неразрешимой, если при этом необходимо еще учитывать и изменение коэффициентов модели при техногенных воздействиях на водосборе. Кроме того, использование модели *HBV* для водосборов с отсутствием данных наблюдений предполагает построение соответствующих карт параметров модели [36-39]. И если для территории Северной Европы соответствующие карты построены, то достаточно надежных карт для всей территории России пока не построено.



Где: Q_i – расход воды, UZ , LZ – параметры модели (уровни воды)

Рисунок 1.1 – Схематическое представление модели *HBV* для напорного водоносного горизонта (рисунок заимствован из оригинальной работы [37])

Указанные два недостатка модели *HBV* вызваны не столько видом применяемых в этой модели расчетных зависимостей для элементов водного баланса (комплексной модели, представленной на рисунке 1.1), сколько количеством подмоделей (блоков—элементов водного баланса), взаимодействие которых в экстраполируемых областях (в том числе при техногенном воздействии) предсказано быть не может, вследствие отсутствия физического обоснования расчетных зависимостей.

Среди физически обоснованных моделей в последнее время все более широкое распространение для прогнозов стока с водосбора получают модели с распределенными и полураспределенными параметрами [13]. Связано это в первую очередь с появлением детальной информации о распределении по площади водосбора его характеристик и внешних воздействий (глубины снежного покрова, интенсивности осадков, фаз вегетации и т.п.), обусловленных развитием методов дистанционного зондирования Земли, геоинформационных технологий [34] и т.п. Преимуществом данного подхода является то, что он хорошо согласуется с гидрогеологической практикой, в которой основой для расчетов выступает геофильтрационная модель (раздел 1.1). Но комплексная (геогидрогеологическая) модель формирования стока с водосбора, созданная для прогноза изменения притока подземных вод, имеет существенные отличия от той же модели, созданной для прогнозов поверхностного стока. При прогнозах стока подземных вод замыкающей моделью (которая выдает выход всей модели, – сток подземных вод с водосбора в карьер) будет являться геофильтрационная модель. При известных, точно определенных фильтрационных параметрах ключевую роль в точности расчетов по этой модели будет играть величина инфильтрационного питания. Данных прямых наблюдений за величиной инфильтрационного питания в районах ГОК, как правило, нет. Поэтому, на сегодняшний день, параметры модели ненасыщенной зоны могут быть определены лишь методами идентификации параметров комплексной модели, по конечному результату, т.е. не по точности прогнозов величины инфильтрационного питания, а по точности

прогнозов подземного стока с водосбора (водопритока к открытым горным выработкам). В условиях дренажного влияния карьера на зону аэрации и водоносные горизонты, очевидно, что параметры этой модели будут изменяться. При отсутствии данных наблюдений за инфильтрационным питанием, поступающим на зеркало подземных вод, учесть такие изменения будет сложно. При большом количестве коэффициентов комплексной модели, которые могут изменяться вследствие техногенных воздействий, проблема эквифинальности для физически обоснованных моделей становится также актуальной, как и для полуэмпирических моделей.

В долгосрочной перспективе, учитывая тенденции развития гидрологического моделирования [13], 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 [46]. 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 [7, 10] 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 [13]. Но, главное, модели формирования стока с сосредоточенными параметрами практически единственны из методов долгосрочных прогнозов, которые могут

быть в настоящее время обеспечены исходными данными (данными гидромониторинга горнодобывающих предприятий).

Дополнительные техногенные воздействия на водосбор, влияющие на речной сток, могут быть учтены в моделях с сосредоточенными параметрами либо как внешнее воздействие, либо введением переменных коэффициентов модели (учет изменения свойств системы под действием тех или иных факторов). Возможность такого подхода обоснована, например, в рамках частично инфинитного подхода (моделирования), разработанного в Российском государственном гидрометеорологическом университете [8, 9]. Целесообразность применения моделей с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов стока с водосбора, в частности речного стока, при воздействии открытых горных работ на режим подземных вод зависит от того, насколько с помощью изменения внешних воздействий или коэффициентов модели удастся учесть техногенные изменения. Подобных исследований, вероятно из-за особенностей междисциплинарного взаимодействия, в литературе найти не удалось. Поэтому предлагаемая работа посвящена разработке методов долгосрочных прогнозов стока с водосборного бассейна, для условий техногенного воздействия на него открытых горных работ с использованием моделей с сосредоточенными параметрами.

Следует подчеркнуть, что выбор моделей с сосредоточенными параметрами для долгосрочных прогнозов стока с водосбора в условиях воздействия открытых горных работ не означает, что они намного более перспективны, чем другие гидрологические методы. Эмпирические методы, модели с распределенными параметрами и др., могут учитывать техногенные изменения. Для всех них можно провести соответствующие исследования по разработке подходов (методов) их применения в условиях влияния на подземный сток горных работ. Но начать подобные работы по адаптации гидрологических методов к этим условиям целесообразно, по сумме указанных причин, именно с моделей с сосредоточенными параметрами.

1.3. Метод-прототип, уточнение задачи исследования

При выборе метода-прототипа необходимо учесть требования, которые предъявляются к методике долгосрочных прогнозов стока в условиях горных работ. Разрабатываемая методика, прежде всего, должна:

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

Отдельно следует выделить проблему оценки эффективности разрабатываемой методики, связанную с оценкой фактической величины подземного питания рек. Поскольку фактическое подземное питание рек прямо не измеряется, эту задачу предложено решить за счет использования в качестве объекта исследования карьеров – практически единственных 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:

$$\tau' \frac{dQ}{dt} + Q = k\dot{X}, \quad (1.3)$$

где Q – сток с водосбора, $\text{м}^3/\text{ед. времени}$; k , τ' – параметры модели; \dot{X} – поступление питания на водосбор, $\text{м}^3/\text{ед. времени}$; t – время, ед. времени.

Эта модель выведена в [7]. Одна из особенностей ее в том, что в отличие от большинства моделей, описывающих движение подземных и поверхностных вод, при ее выводе прямо не использовались законы движения (закон Дарси, формула Шези). Коэффициенты k и τ' получены из предположений, которые могут быть

справедливы как для поверхностных, так и для подземных вод. Вероятно, по этой причине модель (1.3) успешно применяется для прогнозов как годового, так и минимального стока [8], т.е. для стока в значительном числе случаев сформированного подземным питанием.

Модель основана на упрощенной двумерной модели стекания по водосбору [12], представленной системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - I \\ q_x = Ch^{\frac{3}{2}} \frac{i_x}{\sqrt{|grad\eta|}} \\ q_y = Ch^{3/2} \frac{i_y}{\sqrt{|grad\eta|}}, \end{array} \right. \quad (1.4)$$

где $\varepsilon = R - I$; R – интенсивность дождя; I – интенсивность инфильтрации воды в почву; H – глубина потока; C – коэффициент Шези; i_x и i_y – уклоны поверхности водосбора соответственно вдоль осей x и y . $grad\eta = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}$

Если осредним модель по ширине бассейна $b(x)$, (по координате y),

$$\int_{b(x)} \frac{\partial H}{\partial t} dy + \int_{b(x)} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy + \int_{b(x)} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = \int_{b(x)} \varepsilon(x, y, t) dy,$$

получим:

$$\frac{\partial F(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = \varepsilon(x, t),$$

где $\varepsilon = R - I$; F – эффективная площадь сечения склона; Q – расход воды.

Выполним осреднение по x .

$$\int_{x_B}^{x_H} \frac{\partial F|(x, t)}{\partial t} dx + \int_{x_B}^{x_H} \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} dx = \int_{x_B}^{x_H} \varepsilon(x, t) dx,$$

Получим

$$\frac{\partial W}{\partial t} + Q = R - I,$$

где W – объем стока.

Приняв допущение, что $W=f(k, \tau)$ и $R-I=kX$ [7], где τ – эффективное время добегания, k – коэффициент стока, получаем модель формирования стока с сосредоточенными параметрами вида:

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

где Q – сток с водосбора (приток в карьер), $\text{м}^3/\text{сут}$; τ – время добегания, сут; k – коэффициент стока; \dot{X} – эффективные осадки, $\text{м}^3/\text{сут}$; t – время, сут.

Или в другом виде

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

где $\tau'=k\cdot\tau$

Модель (1.3) 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 дождовыми 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 (1.3) 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 свойствами водоносных горизонтов (упругая и гравитационная емкость, водопроводимость).

Влияние на смысл коэффициентов, будут оказывать и техногенные воздействия. В частности, дренажное влияние карьеров. Развитие депрессионной

воронки, приведет к изменению водопроводимости и емкостных запасов. В геофильтрационной модели (уравнение Буссинеска) это может быть учтено, а в модели с сосредоточенными параметрами изменение водопроводимости безнапорных водоносных горизонтов будет зафиксировано опосредованно, через изменение коэффициентов модели (k и τ'). Причем, вероятно, что в случае резкого техногенного снижения уровней подземных вод, целесообразно говорить о уровнепроводности, аналогом которой в модели (1.3) 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 (характеристики дренажной системы, в том числе расход карьерного водоотлива, расход водопонижающих скважин и т.п.). При таком подходе цель исследования можно уточнить («сузить») до решения задачи – насколько изменения коэффициентов модели (1.3) могут быть надежно предсказаны с использованием имеющихся в распоряжении горнодобывающих предприятий данных (расходах воды в различных участках дренажной системы, характерных уровнях подземных вод и т.п.).

Для решения поставленных задач были проведены следующие исследования.

1. На основании модели (1.3) разработана методика прогноза годовых и сезонных изменений водопритока к карьерам (разрезам).
2. Поставлен численный эксперимент по сравнению прогнозов, основанных на модели формирования стока с сосредоточенными параметрами (1.3), и геофильтрационной модели (модели с распределенными параметрами).
- 2.1. Выбран реальный объект исследования – карьер трубки им. В. Гриба. Создана геофильтрационная модель для его площади водосбора (водного бассейна).

- 2.2. Выполнен расчет среднемесячных и среднегодовых значений водопритока в карьер с помощью геофильтрационной модели с различными вариантами природных и техногенных внешних воздействий.
- 2.3. Для тех же условий спрогнозированы водопритоки к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.
- 2.4. Выполнен анализ полученных результатов.
3. Проведена апробация созданной методики для прогноза годовых и сезонных изменений водопритока для действующих и отработанных карьеров, разрабатывающих месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.
4. Выполнена апробация созданной методики для долгосрочных прогнозов среднегодового и минимального суточного в году стока на примере рек района месторождения алмазов им. В. Гриба.
5. Выполнен анализ проведенных исследований.

1.4. Методика прогноза водопритока к карьерам на основе модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.

Идентификация параметров моделей может быть проведена различными способами. 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 рассмотрим вариант модели с сосредоточенными параметрами (1.3) в численной реализацией вида

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t + \frac{\Delta t}{\tau} X_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t, \quad (1.5a)$$

и

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t + \frac{\Delta t k}{\tau'} X_t - \frac{\Delta t}{\tau'} Q_t, \quad (1.5b)$$

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, а именно:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{np} - Q_t^\phi)^2}{n-1}} \rightarrow 0, \quad (1.6)$$

где S – среднеквадратическая ошибка расчетов, $\text{м}^3/\text{сут}$; Q^ϕ – фактический (измеренный) сток с водосбора, $\text{м}^3/\text{сут}$; Q^{np} – рассчитанный по модели сток с водосбора, $\text{м}^3/\text{сут}$; n – длина ряда наблюдений;

Подставив в (1.6) вместо Q^{np} выражение (1.5а) и (1.5б) получаем:

$$f(k, \tau) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{\tau} X_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.7a)$$

$$f(k, \tau') = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + \frac{\Delta t k}{\tau'} X_t - \frac{\Delta t}{\tau'} Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.7b)$$

Решив задачу минимума для (1.7), можно найти коэффициенты k и τ (τ'). Тривиальное решение можно получить как для случая $k=const$ и $\tau=const$, так и для ряда случаев линейных зависимостей $1/k=f(Y_1)$ и $1/\tau=f(Y_2)$, где Y_1 и Y_2 известные измеренные параметры, например: водоприток в карьер, дебит дренажной системы, температура воздуха, атмосферные осадки, величина снежного покрова, уровни воды и т.п.

1.4.1 Определение параметров модели

Для создания методики и ее практического применения рассмотрим некоторые основные варианты модели (1.3), при которых ее коэффициенты могут быть определены методом наименьших квадратов.

Рассчитаем параметры модели при постоянных коэффициентах

Введем обозначения: $a = \frac{\Delta t}{\tau}$ и $b = \frac{1}{k}$.

Уравнение (1.7а) в этом случае приобретает вид:

$$f(a, b) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + a \cdot X_t - a \cdot b \cdot Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.8)$$

Найдем частные производные для (1.8) и решим задачу минимума

$$\begin{cases} \frac{\partial f(a,b)}{\partial a} = 2 \cdot \sum_{t=1}^n X_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + a \cdot Q_t - a \cdot b \cdot Q_t) = 0 \\ \frac{\partial f(a,b)}{\partial b} = -2 \cdot a \cdot \sum_{t=1}^n X_t \cdot Q_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + a \cdot X_t - a \cdot b \cdot Q_t) = 0 \end{cases}$$

Введем обозначения:

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

Тогда система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} a \cdot b^2 \cdot A_3 - b \cdot A_3 - 2a \cdot b \cdot A_1 + A_1 + b \cdot A_4 + a \cdot A_5 - A_2 = 0 \\ b \cdot a^2 \cdot A_3 - a \cdot A_3 - a^2 \cdot A_1 + a \cdot A_4 = 0 \end{cases}$$

Эта система уравнений имеет единственное решение:

$$a = \frac{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}{A_1^2 - A_3 \cdot A_5}, \quad (1.9)$$

$$b = \frac{A_1^2 - A_2 \cdot A_1 - A_3 \cdot A_5 + A_4 \cdot A_5}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}, \quad (1.10)$$

Соответственно, коэффициенты модели:

$$\tau = \frac{\Delta t \cdot (A_1^2 - A_3 \cdot A_5)}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}, \quad (1.11)$$

$$k = \frac{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}{A_1^2 - A_2 \cdot A_1 - A_3 \cdot A_5 + A_4 \cdot A_5}, \quad (1.12)$$

Рассмотрим случай, когда $\frac{\Delta t}{\tau} = f(Y) = a \cdot Y + b$, $\frac{\Delta t}{k\tau} = f(Z) = c \cdot Z + d$,

где: Y и Z – предикторы (количество осадков, высота снежного покрова, температура воздуха и т.п.); a, b, c, d – коэффициенты уравнения линейной регрессии.

Уравнение (1.7а) в этом случае приобретает вид:

$$f(a, b, c, d) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + (a \cdot Y_t + b) \cdot X_t - (c \cdot Z_t + d) \cdot Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.13)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum_{t=1}^n ((Q_t)^2 \cdot (Z_t)^2), & A_2 &= \sum_{t=1}^n ((Q_t)^2 \cdot Z_t), \\ A_3 &= \sum_{t=1}^n (Q_t)^2, & A_4 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_{t+\Delta t} \cdot Z_t), \\ A_5 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_{t+\Delta t}), & A_6 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t \cdot Y_t \cdot Z_t), \\ A_7 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_8 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t \cdot Z_t), \\ A_9 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t), & A_{10} &= \sum_{t=1}^n (Q_{t+\Delta t})^2, \\ A_{11} &= \sum_{t=1}^n (Q_{t+\Delta t} \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{12} &= \sum_{t=1}^n (Q_{t+\Delta t} \cdot X_t), \\ A_{13} &= \sum_{t=1}^n ((X_t)^2 \cdot (Y_t)^2), & A_{14} &= \sum_{t=1}^n ((X_t)^2 \cdot Y_t), \\ A_{15} &= \sum_{t=1}^n (X_t)^2. \end{aligned}$$

Тогда формула (1.13) приобретает вид:

$$\begin{aligned} f(a, b, c, d) = & A_1 \cdot c^2 + 2 \cdot A_2 \cdot c \cdot d - 2 \cdot A_2 \cdot c + A_3 \cdot d - 2 \cdot A_3 \cdot d + A_3 + 2 \cdot A_4 \cdot c + 2 \cdot A_5 \cdot d - \\ & - 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_6 \cdot a \cdot c - 2 \cdot A_7 \cdot a \cdot d - 2 \cdot A_7 \cdot a - 2 \cdot A_8 \cdot b \cdot c - 2 \cdot A_9 \cdot b \cdot d + 2 \cdot A_9 \cdot b + \\ & + A_{10} - 2 \cdot A_{11} \cdot a - 2 \cdot A_{12} \cdot b + A_{13} \cdot a^2 + 2 \cdot A_{14} \cdot a \cdot b + A_{15} \cdot b^2 \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (1.14)$$

Найдем частные производные для (1.14) и решим задачу минимума

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial a} = 2 \cdot A_7 - 2 \cdot A_{11} + 2 \cdot A_{13} \cdot a + 2 \cdot A_{14} \cdot b - 2 \cdot A_6 \cdot c - 2 \cdot A_7 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial b} = 2 \cdot A_9 - 2 \cdot A_{12} + 2 \cdot A_{14} \cdot a + 2 \cdot A_{15} \cdot b - 2 \cdot A_8 \cdot c - 2 \cdot A_9 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial c} = 2 \cdot A_4 - 2 \cdot A_2 - 2 \cdot A_6 \cdot a - 2 \cdot A_8 \cdot b + 2 \cdot A_1 \cdot c + 2 \cdot A_2 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial d} = 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_3 - 2 \cdot A_7 \cdot a - 2 \cdot A_9 \cdot b + 2 \cdot A_2 \cdot c + 2 \cdot A_3 \cdot d = 0 \end{array} \right.$$

Решим систему из этих четырех уравнений с помощью матриц. Составим основной определитель системы (Δ) и определители по переменным a, b, c, d ($\Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$ и Δ_d соответственно):

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{13} & A_{14} & -A_6 & -A_7 \\ A_{14} & A_{15} & -A_8 & -A_9 \\ -A_6 & -A_8 & A_1 & A_2 \\ -A_7 & -A_9 & A_2 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} (A_{11}-A_7) & A_{14} & -A_6 & -A_7 \\ (A_{12}-A_9) & A_{15} & -A_8 & -A_9 \\ (A_2-A_4) & -A_8 & A_1 & A_2 \\ (A_3-A_5) & -A_9 & A_2 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} A_{13} & (A_{11}-A_7) & -A_6 & -A_7 \\ A_{14} & (A_{12}-A_9) & -A_8 & -A_9 \\ -A_6 & (A_2-A_4) & A_1 & A_2 \\ -A_7 & (A_3-A_5) & A_2 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} A_{13} & A_{14} & (A_{11}-A_7) & -A_7 \\ A_{14} & A_{15} & (A_{12}-A_9) & -A_9 \\ -A_6 & -A_8 & (A_2-A_4) & A_2 \\ -A_7 & -A_9 & (A_3-A_5) & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} A_{13} & A_{14} & -A_6 & (A_{11}-A_7) \\ A_{14} & A_{15} & -A_8 & (A_{12}-A_9) \\ -A_6 & -A_8 & A_1 & (A_2-A_4) \\ -A_7 & -A_9 & A_2 & (A_3-A_5) \end{vmatrix}$$

Эта система уравнений имеет единственное решение в подавляющем большинстве случаев. Сложно представить природный процесс, в котором суммы A_1, \dots, A_{15} , в определенном сочетании сделают основной определитель системы равным нулю.

$$a = \frac{A_a}{\Delta}, \quad b = \frac{A_b}{\Delta}, \quad c = \frac{A_c}{\Delta}, \quad d = \frac{A_d}{\Delta}, \quad (1.15)$$

Вычислять коэффициенты k и τ не обязательно, для расчета (прогноза) можно использовать выражение (1.15). Выражать решение в виде четырех алгебраических уравнений не целесообразно из-за их большого размера. Реализовать решение уравнений с помощью матриц можно в существующих распространенных специализированных программных комплексах (например *MatLab*), а также программах электронных таблиц (например *MS Excel*). Относительно короткое и удобное для практического применения решение можно получить только для системы уравнений не более чем с тремя неизвестными, например при постоянном коэффициенте стока и переменном времени дебегания.

Рассмотрим случай, когда $\tau=const$, $\frac{1}{k} = f(Y)$.

Введем обозначения: $a = \frac{\Delta t}{\tau}$ и $\frac{1}{k\tau} = f(Y) = c \cdot Y + d$,

где Y – предиктор (количество осадков, высота снежного покрова, температура воздуха и т.п.); c, d – коэффициенты уравнения линейной регрессии.

Уравнение (1.7а) в этом случае приобретает вид:

$$f(a, c, d) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + a \cdot X_t - (c \cdot Y_t + d) \cdot Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.16)$$

С учетом введенных ранее обозначений

$$\begin{aligned} f(a, b, c) = & A_1 \cdot c^2 + 2 \cdot A_2 \cdot c \cdot d - 2 \cdot A_2 \cdot c + A_3 \cdot d^2 - 2 \cdot A_3 \cdot d + A_3 + 2 \cdot A_4 \cdot c + 2 \cdot A_5 \cdot d - \\ & - 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_8 \cdot a \cdot c - 2 \cdot A_9 \cdot a \cdot d + 2 \cdot A_9 \cdot a + A_{10} - 2 \cdot A_{12} \cdot a + A_{15} \cdot a^2 \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (1.17)$$

Решим задачу минимума для (1.17)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f(a,c,d)}{\partial a} = 2 \cdot A_9 - 2 \cdot A_{12} + 2 \cdot A_{15} \cdot a - 2 \cdot A_8 \cdot c - 2 \cdot A_9 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a,c,d)}{\partial b} = 2 \cdot A_4 - 2 \cdot A_2 - 2 \cdot A_8 \cdot a + 2 \cdot A_1 \cdot c + 2 \cdot A_2 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a,c,d)}{\partial c} = 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_3 - 2 \cdot A_9 \cdot a + 2 \cdot A_2 \cdot c + 2 \cdot A_3 \cdot d = 0, \end{array} \right.$$

Решим систему из этих трех уравнений с помощью матриц. Составим основной определитель системы (Δ) и определители по переменным a, b, c (Δ_a, Δ_c и Δ_d соответственно):

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{15} & -A_8 & -A_9 \\ -A_8 & A_1 & A_2 \\ -A_9 & A_2 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} (A_{12}-A_9) & -A_8 & -A_9 \\ (A_2-A_4) & A_1 & A_2 \\ (A_3-A_5) & A_2 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} A_{15} & (A_{12}-A_9) & -A_9 \\ -A_{18} & (A_2-A_4) & A_2 \\ -A_9 & (A_3-A_5) & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} A_{15} & -A_8 & (A_{12}-A_9) \\ -A_{18} & A_1 & (A_2-A_4) \\ -A_9 & A_2 & (A_3-A_5) \end{vmatrix}$$

Эта система уравнений имеет единственное решение в подавляющем большинстве случаев.

$$a = \frac{\Delta_a}{\Delta} = \frac{A_2^2 \cdot A_{12} - 2 \cdot A_2^2 \cdot A_9 + 2 \cdot A_1 \cdot A_3 \cdot A_9 - A_1 \cdot A_5 \cdot A_9 + A_2 \cdot A_4 \cdot A_9 + A_2 \cdot A_5 \cdot A_8 - A_3 \cdot A_4 \cdot A_8 - A_1 \cdot A_3 \cdot A_{12}}{A_{15} \cdot A_2^2 - 2 \cdot A_2 \cdot A_8 \cdot A_9 + A_3 \cdot A_8^2 + A_1 \cdot A_9^2 - A_1 \cdot A_3 \cdot A_{15}} \quad (1.18)$$

$$c = \frac{\Delta_c}{\Delta} = \frac{A_4 \cdot A_9^2 - 2 \cdot A_2 \cdot A_9^2 + 2 \cdot A_3 \cdot A_8 \cdot A_9 - A_5 \cdot A_8 \cdot A_9 + A_2 \cdot A_5 \cdot A_{15} - A_3 \cdot A_4 \cdot A_{15} + A_2 \cdot A_9 \cdot A_{12} - A_3 \cdot A_8 \cdot A_{12}}{A_{15} \cdot A_2^2 - 2 \cdot A_2 \cdot A_8 \cdot A_9 + A_3 \cdot A_8^2 + A_1 \cdot A_9^2 - A_1 \cdot A_3 \cdot A_{15}} \quad (1.19)$$

$$d = \frac{\Delta_d}{\Delta} = \frac{A_1 \cdot A_9^2 - A_3 \cdot A_8^2 + A_5 \cdot A_8^2 - A_2^2 \cdot A_{15} - A_4 \cdot A_8 \cdot A_9 + A_1 \cdot A_3 \cdot A_{15} - A_1 \cdot A_5 \cdot A_{15} + A_2 \cdot A_4 \cdot A_{15} - A_1 \cdot A_9 \cdot A_{12} + A_2 \cdot A_8 \cdot A_{12}}{A_{15} \cdot A_2^2 - 2 \cdot A_2 \cdot A_8 \cdot A_9 + A_3 \cdot A_8^2 + A_1 \cdot A_9^2 - A_1 \cdot A_3 \cdot A_{15}} \quad (1.20)$$

Рассмотрим случай, когда $k=f(Y)$, $\frac{1}{\tau'} = const$

Введем обозначения: $\frac{\Delta t k}{\tau'} = f(Y) = a \cdot Y + b$, и $d = \frac{\Delta t}{\tau'}$,

где Y – предиктор (количество осадков, высота снежного покрова, температура воздуха и т.п.); a, b – коэффициенты уравнения линейной регрессии.

Уравнение (1.76) в этом случае приобретает вид:

$$f(a, b, d) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + (a \cdot Y_t + b) \cdot X_t - d \cdot Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.21)$$

С учетом введенных ранее обозначений

$$f(a, b, d) = A_3 \cdot d^2 - 2 \cdot A_3 \cdot d + A_3 + 2 \cdot A_5 \cdot d - 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_7 \cdot a \cdot d + 2 \cdot A_7 \cdot a - 2 \cdot A_9 \cdot b \cdot d + 2 \cdot A_9 \cdot b + A_{10} - 2 \cdot A_{11} \cdot a - 2 \cdot A_{12} \cdot b + A_{13} \cdot a^2 + 2 \cdot A_{14} \cdot a \cdot b + A_{15} \cdot b^2 \quad (1.22)$$

Решим задачу минимума для (1.22)

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial f(a, b, d)}{\partial a} = 2 \cdot A_7 - 2 \cdot A_{11} + 2 \cdot A_{13} \cdot a + 2 \cdot A_{14} \cdot b - 2 \cdot A_7 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a, b, d)}{\partial b} = 2 \cdot A_9 - 2 \cdot A_{12} + 2 \cdot A_{14} \cdot a + 2 \cdot A_{15} \cdot b - 2 \cdot A_9 \cdot d = 0 \\ \frac{\partial f(a, b, d)}{\partial d} = 2 \cdot A_5 - 2 \cdot A_3 - 2 \cdot A_7 \cdot a - 2 \cdot A_9 \cdot b + 2 \cdot A_3 \cdot d = 0, \end{array} \right]$$

Решим систему из этих трех уравнений с помощью матриц. Составим основной определитель системы (Δ) и определители по переменным a, b, c (Δ_a, Δ_b и Δ_d соответственно):

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{13} & A_{14} & -A_7 \\ A_{14} & A_{15} & -A_9 \\ -A_7 & -A_9 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} (A_{11}-A_7) & A_{14} & -A_7 \\ (A_{12}-A_9) & A_{15} & -A_9 \\ (A_3-A_5) & -A_9 & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} A_{13} & (A_{11}-A_7) & -A_7 \\ A_{14} & (A_{12}-A_9) & -A_9 \\ -A_7 & (A_3-A_5) & A_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} A_{13} & A_{14} & (A_{11}-A_7) \\ A_{14} & A_{15} & (A_{12}-A_9) \\ -A_7 & -A_9 & (A_3-A_5) \end{vmatrix}$$

Эта система уравнений имеет единственное решение в подавляющем большинстве случаев. Расписывать решение в виде алгебраических уравнений нецелесообразно. Реализовать решение уравнений с помощью матриц можно в существующих распространенных специализированных программных комплексах (например *MatLab*), а также программах электронных таблиц (например, *MS Excel*).

Рассмотрим случай, когда $\frac{4t}{\tau} = f(Y) = a \cdot Y + b$, $\frac{1}{k} = f(Z) = c \cdot Z + d$,

где: Y и Z – предикторы (количество осадков, высота снежного покрова, температура воздуха и т.п.); a, b, c, d – коэффициенты уравнения линейной регрессии.

Уравнение (1.7а) в этом случае приобретает вид:

$$f(a, b, c, d) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + (a \cdot Y_t + b) \cdot X_t - (a \cdot Y_t + b) \cdot (c \cdot Z_t + d) \cdot Q_t)^2 \rightarrow 0, \quad (1.23)$$

При решении задачи минимума для данной функции получим систему нелинейных уравнений. Ее решение не тривиально, а следовательно, на основании данной модели создать простой и удобный в использовании на производстве метод прогноза водопритока не получиться. Но альтернативой этой модели может выступить линейная модель с шестью коэффициентами.

Введем обозначения: $a=l_1$; $b=l_2$; $-a \cdot c=l_3$; $-a \cdot d=l_4$; $-b \cdot c=l_5$; $-b \cdot d=l_6$,

тогда (1.21) принимает вид:

$$f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) = \sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6)^2 \rightarrow 0, \quad (1.24)$$

Решим задачу минимума для (1.24)

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_1} &= 2 \sum_{t=1}^n X_t \cdot Y_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0 \\ \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_2} &= 2 \sum_{t=1}^n X_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0 \\ \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_3} &= 2 \sum_{t=1}^n Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0 \\ \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_4} &= 2 \sum_{t=1}^n Q_t \cdot Y_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0 \\ \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_5} &= 2 \sum_{t=1}^n Q_t \cdot Z_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Y_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0 \\ \frac{\partial f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{\partial l_6} &= 2 \sum_{t=1}^n Q_t \cdot (Q_t - Q_{t+\Delta t} + X_t \cdot Y_t \cdot l_1 + X_t \cdot l_2 + Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot l_3 + Q_t \cdot Y_t \cdot l_4 + \\ &Q_t \cdot Z_t \cdot l_5 + Q_t \cdot l_6) = 0, \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t), & A_2 &= \sum_{t=1}^n (X_t), \\
 A_3 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_4 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t), \\
 A_5 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t), & A_6 &= \sum_{t=1}^n (Q_t), \\
 A_{11} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{12} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot X_t), \\
 A_{13} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{14} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{15} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{16} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Y_t \cdot Q_t), \\
 A_{21} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{22} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot X_t), \\
 A_{23} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{24} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{25} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{26} &= \sum_{t=1}^n (X_t \cdot Q_t), \\
 A_{31} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{32} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot X_t), \\
 A_{33} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{34} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{35} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{36} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t \cdot Q_t), \\
 A_{41} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{42} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot X_t), \\
 A_{43} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{44} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{45} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{46} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Y_t \cdot Q_t), \\
 A_{51} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{52} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot X_t), \\
 A_{53} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{54} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{55} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{56} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Z_t \cdot Q_t), \\
 A_{61} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t \cdot Y_t), & A_{62} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t), \\
 A_{63} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_t \cdot Y_t \cdot Z_t), & A_{64} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_t \cdot Y_t), \\
 A_{65} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_t \cdot Z_t), & A_{66} &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_t).
 \end{aligned}$$

Тогда систему уравнений можно представить в виде матриц

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{61} & \cdots & A_{66} \end{bmatrix} \cdots,$$

Расписывать решение в виде алгебраических уравнений нецелесообразно.

Реализовать решение уравнений с помощью матриц можно в существующих

распространенных специализированных программных комплексах (например *MatLab*), а также программах электронных таблиц (например, *MS Excel*).

1.4.2 Методика прогноза водопритока к карьерам на основе модели формирования стока с сосредоточенными параметрами

На основании раздела 1.4.1 можно предложить следующую методику составления прогнозов среднегодовых и минимального суточного в году стока с водосбора (водопритока к карьеру, стока рек).

1. Собрать непрерывные ряды совместных наблюдений за водопритоком и атмосферными осадками, продолжительностью не менее 15–20 лет. Дополнительно, при наличии, за этот же период времени собрать ряды температуры воздуха, высоты снежного покрова или влагозапасов в снежном покрове, уровней воды в характерных наблюдательных скважинах, сведения о техногенном воздействии (дебите откачивающих скважин, расходов воды в дренажной системе, глубине карьера и т.п.).

При наличии непрерывных рядов наблюдений более чем за 20-30 лет, разделить их на две части. Первую часть использовать для идентификации параметров модели, вторую – для оценки оправдываемости прогнозов на независимом материале.

2. Провести идентификацию параметров модели с постоянными коэффициентами по формулам 1.9 и 1.10. Оценить точность (оправдываемость прогнозов) по критериям S/σ и S/σ_Δ [22], где S – среднеквадратическая ошибка расчетов (1.6), σ – среднее квадратическое отклонение предсказываемой переменной от нормы (1.25), σ_Δ – среднее квадратическое отклонение изменение той же переменной от среднего ее изменения за период заблаговременности прогноза (1.26).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}, \quad (1.25)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \quad (1.26)$$

где Q_i – расход воды, м³/сут; Q – средний расход, м³/сут; Δ_i – изменение предсказываемой переменной за период заблаговременности прогноза; $\bar{\Delta}$ – среднее изменение.

3. Провести идентификацию параметров модели с переменными коэффициентами (раздел 1.4.1). В качестве предикторов в функции для вычисления коэффициента стока и времени добегания попаременно использовать дополнительные ряды данных (водопритока к карьеру, среднемесячных уровнях в характерных наблюдательных скважинах, дебитах водопонижающих скважин и т.п.). Оценить оправдываемость прогнозов по критериям S/σ и S/σ_{Δ} . Выбрать наилучший вариант (с наименьшим S/σ).

Прогнозы считать нецелесообразными при $S/\sigma > 0,8$; «удовлетворительными» при $0,5 < S/\sigma < 0,8$; «хорошими» при $S/\sigma < 0,5$ [22].

Если оправдываемость прогнозов по модели с переменными коэффициентами отличается от модели с постоянными коэффициентами менее чем на 0,1, то для прогнозов применять модель с постоянными коэффициентами (при $S/\sigma < 0,8$).

Методику для расчета среднегодового стока можно использовать и для расчета среднемесячного стока с водосбора с той лишь разницей, что необходимо использовать ряды данных среднемесячных значений указанных характеристик, продолжительностью не менее 3-5 лет.

2. Численный эксперимент по сравнению модели формирования стока с сосредоточенными параметрами с геофильтрационной моделью

Решение задачи оценки эффективности применения модели (1.3) для прогноза стока с водосбора в условиях изменения режима подземных вод связано с рядом сложностей. В частности, с измерением фактического подземного стока и самим его определением. Соотношение в общем притоке к участку реки подземных и поверхностных вод не измеряется прямыми методами. Можно предложить ряд способов для генетического разделения стока. Например, зная химический состав подземных и поверхностных вод, можно определить их долю в общем известном притоке к участку реки [35]. Но для точного расчета среднемесячного притока подземных вод в этом случае понадобятся не только ежедневные наблюдения за стоком, но и за химическим составом подземных и поверхностных вод. Такие детальные наблюдения за химическим составом подземных и поверхностных вод на водосборной площади карьеров, как правило, не проводятся.

Использование методов расчленения гидрографа [5] сопряжено с проблемой определения понятия подземного стока. Фактически, при расчленении гидрографа происходит не определение, а переопределение понятия (переназвание) поверхностного и подземного стока. Подземным стоком называется «медленный» и постоянный сток, поверхностным стоком – «быстрый». Для решения ряда гидрологических задач, как показала многолетняя практика, это допустимо, но в нашем случае такое переопределение понятия подземного стока может привести к неверным выводам. В частности, один метод (геофильтрационная модель) может прогнозировать подземный сток из насыщенной зоны, какой-либо эмпирический метод – «медленный» сток, а модель формирования стока с сосредоточенными параметрами – сток подземных вод с элементами «медленного» стока. Сравнивать прогнозы подземного питания рек по этим методам некорректно, а сравнивать с фактическими значениями невозможно из-за их отсутствия. Поэтому, для оценки

эффективности применения модели (1.3) для долгосрочных прогнозов подземного стока с водосбора был проведен численный эксперимент по ее сравнению с геофильтрационной моделью.

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

Численный эксперимент состоял из следующих основных этапов:

- выбран реальный карьер, где доля подземного притока много больше поверхностного, как за счет перехвата поверхностного стока нагорными канавами, так и за счет значительной абсолютной величины притока подземных вод.
- Для водного бассейна карьера была создана геофильтрационная модель с постоянным среднемноголетним инфильтрационным питанием, которая, с максимально возможной для принятого внешнего воздействия точностью, воспроизводила фактический водоприток в карьер, изменение подземного питания рек, уровенный режим подземных вод при заданных реальных техногенных воздействиях.
- На основе созданной базовой геофильтрационной модели были разработаны тестовые модели, с помощью которых, при различных сценариях задания техногенных воздействий и инфильтрационного питания, были рассчитаны (спрогнозированы) величины водопритока в карьер и подземного питания рек.
- Полученные расчетные ряды водопритока в карьер и подземного питания рек были приняты за фактические и спрогнозированы с помощью модели (1.3).
- Выполнена оценка оправдываемости прогнозов.

Данная постановка эксперимента, сравнение модели формирования стока (1.3) с рассчитанными значениями водопритока, а не с фактическими, решает проблему неопределенности величины подземного стока в общем, измеренном

стоке. В этом случае если и будет переопределение термина подземный сток, то им будет называться сток подчиняющийся закону Дарси (рассчитанный с использованием геофильтрационной модели). Таким образом, сравнивая две модели, получим оценку эффективности модели (1.3) для прогнозов именно подземного стока из насыщенной зоны. При этом, неполное соответствие геофильтрационной модели реальным условиям может быть интерпретировано, как проведение численного эксперимента для незначительно измененных гидрогеологических условий.

Следует отметить, что метод численного эксперимента не единственно возможный. Для геофильтрационной модели (1.1) разработано множество аналитических решений для конкретных типов (схем) гидрогеологических условий. Можно провести сравнительный анализ модели (1.3) и аналитических формул для тех или иных типовых условий. Но, на данном этапе исследования предпочтение было отдано методу численного эксперимента, поскольку геофильтрационная модель наиболее полно описывает реальные гидрогеологические условия месторождения им. В. Гриба, для рек в районе которого, составлялись прогнозы стока.

2.1 Тестовая геофильтрационная модель на примере карьера поля трубы им. В. Гриба

Основой для тестовой геофильтрационной модели, предназначеннной для сравнения с моделью формирования стока с сосредоточенными параметрами (по точности прогноза водопритока), была выбрана геофильтрационная модель района месторождения им. Гриба.

2.1.1. Краткие сведения о месторождении имени В. Гриба

Карьер находится в северной части Беломорско-Кулойского плато, в Мезенском районе Архангельской области, в месте пересечения долин озер Волчье и Черное. Карьер разрабатывается с 2011 года. К концу 2023 года были вскрыты отложения 6-и водоносных и водоупорных горизонтов (комплексов),

глубина карьера составила 300 м. Для обеспечения безопасного ведения горных работ вокруг карьера создан контур водопонижающих скважин. Средняя суммарная производительность водопонижающих скважин – 6321 м³/час, средняя производительность карьерного водоотлива в первой половине октября 2023 г. составляла 1163 м³/час. Поверхностный сток перехватывался нагорными канавами.

Климат района, геологическое строение, гидрологические условия подробно изложены в работе [32]. Выделим главное из них.

Изучаемая площадь представляет собой залесенную и заболоченную пологоволнистую равнину, пересеченную многочисленными речными долинами с карстовыми воронками, озерными и болотными западинами. Абсолютные отметки изменяются от 50-60 м в тальвегах речных долин до 120–130 м на водоразделах.

Климат района умеренно-континентальный, с продолжительной зимой и коротким летом. Среднегодовая температура воздуха –0,6°C (по данным метеостанции Кепино [14]). Среднегодовое количество осадков составляет 571 мм, максимальное – 734 мм. По соотношению годовых осадков и испаряемости район относится к зоне избыточного увлажнения (коэффициент атмосферного увлажнения 2,0). Зима холодная, со средней температурой воздуха самого холодного месяца (февраль) –15,1°C, преимущественно с частыми метелями и пасмурной погодой. Устойчивый снежный покров образуется в начале ноября. Таяние снега начинается в конце апреля – начале мая. К марта толщина снежного покрова достигает 0,4–0,8 м. Лето прохладное, средняя температура воздуха самого теплого летнего месяца (июль) +14,3°C. Погода часто пасмурная с моросящими дождями, ливни бывают 2–3 раза в месяц. Промерзание почвы начинается в конце октября – начале ноября. Средняя глубина промерзания минеральных почв в марте достигает 102 см, торфяников – 50 см.

2.1.2 Геолого-структурная модель

В соответствии с геологическим строением в районе месторождения выделяются следующие гидрогеологические структуры [19]:

- водоносный комплекс четвертичных отложений;
- каменноугольный водоносный комплекс, представленный доломитами олмург-окуневской свиты, подстилающими их песчаниками и алевролитами воереченской свиты, а также песчаниками урзугской свиты;
- комплекс водоносных отложений падунской свиты венда, представленный преимущественно песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов;
- комплекс слабопроницаемых отложений мезенской свиты венда, представленных переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов;
- комплекс отложений усть-пинежской свиты венда, представленных преимущественно слабопроницаемыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами.

Непосредственно на участке алмазоносной трубы отложения венда замещены продуктивными образованиями девон-карбонового возраста, перекрытыми водоносными комплексами карбоновых и четвертичных отложений.

Четвертичный водоносный комплекс представлен отложениями различного генезиса – водными, водо-ледниковые и озерными; залегает первым от поверхности. Литологические разности представлены песками, супесями и суглинками.

Олмург-окуневский и урзугский водоносные горизонты залегают под четвертичными отложениями. От четвертичного водоносного комплекса олмург-окуневский водоносный горизонт отделен водоупором в подошве четвертичных отложений и зоной аэрации под ним.

Водовмещающими породами олмург-окуневского горизонта являются закарстованные доломитизированные известняки. В верхней части известняки разрушены до состояния карбонатной «муки», которая является относительным

водоупором. Урзугский водоносный горизонт изолирован от олмugo-окуневского выдержаным по площади горизонтом воереченских глин. Он подстилается менее проницаемой пачкой алевролитов и аргиллитов, что в свою очередь затрудняет гидравлическую связь между ним и падунским водоносным комплексом. Водовмещающими породами для урзугского водоносного горизонта являются преимущественно трещиноватые песчаники.

Падунский водоносный комплекс представлен переслаиванием песчаников, аргиллитов и алевролитов. В кровле комплекса присутствует выдержанный и относительно мощный прослой аргиллитов, который затрудняет гидравлическую связь между ним и урзугским горизонтом. Падунский водоносный комплекс обладает наибольшей водопроводимостью в разрезе и формирует наиболее значимые притоки в карьер.

Мощная (до 250 м) толща мезенских отложений, представленная частым переслаиванием слабопроницаемых песчаников, алевролитов и аргиллитов, может рассматриваться в качестве относительного водоупора для залегающих выше водоносных комплексов. Мезенские отложения характеризуются явно выраженной анизотропией при среднем значении коэффициентов фильтрации порядка 10^{-3} м/сутки.

Мезенские отложения вскрываются карьером не на полную мощность (до отметки минус 200 м абс. в 2023 году); залегающий в подошве этих отложений усть-пинежский водоносный комплекс можно не рассматривать в рамках концептуальной геофильтрационной модели месторождения.

Геолого-структурная модель построена по данным колонок геологоразведочных скважин, представленных в [20]. Разрешение цифровой модели в плане 50*50 м и 1 м по глубине. Границы модели и использованные скважины представлены на рисунке 2.1. Модель построена для 6-и расчетных слоев: четвертичных отложений (Q), олмugo-окуневской (C_{2ol}), воереченской (C_{2vr}), урзугской (C_{2ur}) свит карбона, падунской (V_{2pd}) и мезенской (V_{2mz}) свит венда.

Рельеф кровли и подошвы построен с помощью алгоритмов программы *LeapFrog*. В полученный рельеф были внесены дополнения. Предполагалось, что вскрытые некоторыми скважинами большие мощности четвертичных отложений связаны со встреченными, глубоко врезанными долинами и палеодолинами. Между подобными скважинами интерполировался или экстраполировался врез существующих речных долин и палеодолин.

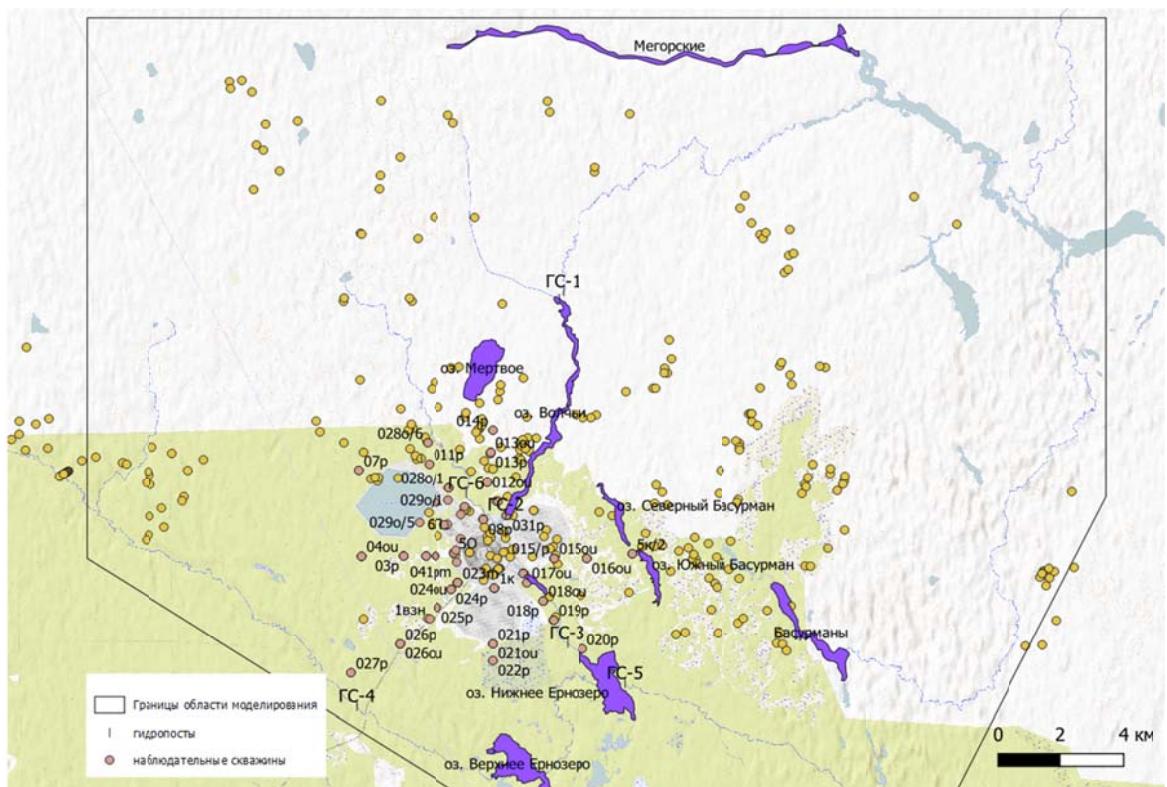


Рисунок 2.1 – Схема расположения границы области моделирования, геологоразведочных скважин и гидропостов

Дополнительного сглаживания и отрисовки рельефа кровли и подошвы в соответствии с той или иной геологической теорией не проводилось, в связи с малым влиянием мелких форм рельефа на проводимость водоносного комплекса, а главное, отсутствия необходимости для тестовой модели полного соответствия реальным условиям. На рисунке 2.2 представлен типовой геологический разрез района месторождения. Полученные карты подошвы (кровли) слоев представлены в приложении А.

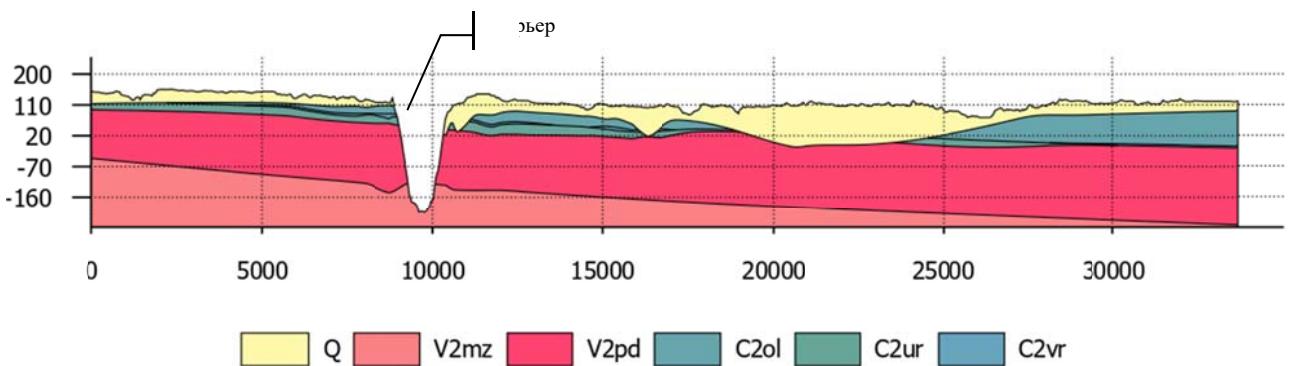


Рисунок 2.2. Типовой геологический разрез рассматриваемой территории

2.1.3 Параметры модели, граничные и начальные условия

Численная геофiltрационная модель района месторождения им. В. Гриба построена с использованием программы Нимфа (Логос Гидрогеология), которая использует неструктурированную сетку с поддержкой выклинивания. Поэтому в модели выделено 6 основных слоев – водоносных и водоупорных горизонтов, которые полностью совпадают с выделенными геологическими подразделениями. Размер ребер сетки в радиусе 5–9 км от карьера 20 м, на больших удалениях 1 км.

Фильтрационные параметры для слоев модели (геологических – гидрогеологических подразделений) были приняты из [19], их значения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Принятые параметры для гидрогеологических подразделений

№ слоя	Подразделение	Коэффициент фильтрации по горизонтали (k_{xy}), м/сут	Коэффициент фильтрации по вертикали (k_z), м/сут	Коэффициент упругоемкости, 1/м	Гравитационная водоотдача
1	Q	30	3,0	0,0001	0,02
2	C ₂ ol	25	0,1	0,0001	0,02
3	C ₂ vr	0,1	0,005	0,0001	0,005
4	C ₂ ur	2,5	0,5	0,0001	0,05
5	V ₂ pd	1,2	0,1	0,00001	0,04
6	V ₂ mz	0,002	0,0002	0,00001	0,0001

В модели были заданы следующие условия на гидродинамических границах:

- инфильтрационное питание с помощью модуля «инфильтрационное питание» для всей модели 0,0003 м/сут, на основании [23];
- реки: Падун, Ерна и Мегра модулем «Сегмент реки» (тип работы – дрена, способ установки – по дну, с дренированием всех вышележащих ячеек);
- реки Кукомка, Верхотина, Волчья; озеро Черное, ручей Нижний Грубый заданы модулем «Сегмент реки» (тип работы – граничное условие третьего рода с переходом во второй род, способ установки – по дну);
- озера Волчье и Басурманы заданы модулем «Водоем, площадная река» (тип работы – граничное условие третьего рода с переходом во второй род, способ установки – по дну);
- карьер задан модулем «Водоем, площадная река» (тип работы – дрена, способ установки – по дну, с дренированием всех вышележащих ячеек), глубина карьера менялась ежегодно в соответствии с фактическим положением карьера на январь каждого года;
- контур водопонижающих скважин (ВПС) задан модулем «Вертикальная скважина»;
- потери воды из хвостохранилища моделировались модулем «инфильтрационное питание».

В модели созданы два основных расчетных периода. Первый – стационарный расчет, восстанавливающий фоновый режим подземных вод до начала эксплуатации дренажных сооружений (31.12.2011), второй – нестационарный расчет после начала работы контура ВПС и углубления карьера (до 06.11.2023).

2.1.4 Калибровка геофильтрационной модели

Геофильтрационная модель калибровалась в первую очередь на соответствие расчетных и фактических значений водопритока. Во вторую очередь контролировалось соответствие модельных и фактических значений уровней

подземных вод в скважинах наблюдательной сети. На водотоках, оборудованных несколькими гидропостами (проточные озера Волчье и Черное), контролировалось соответствие фактической и прогнозной величин их подземного питания (разгрузки).

Калибровка модели проводилась преимущественно за счет изменения характеристик гидравлической связи между поверхностными и подземными водами. В терминах программы НИМФА это «расчетный коэффициент фильтрации» для рек и «коэффициент перетока» для озер. Фильтрационные параметры водоносных горизонтов (табл. 2.1) в процессе калибровки изменений не претерпели.

На первом этапе калибровки, при постоянных значениях расчетного коэффициента фильтрации (руслового сопротивления), удалось достичь только соответствия напоров в основном водоносном горизонте. Результаты первого этапа калибровочных расчетов напоров в основном (падунском) водоносном комплексе на 31.12.2023 представлены на рисунках 2.2–2.5. Принятые при этом параметры руслового сопротивления рек (расчетные коэффициенты фильтрации речных отложений) представлены в таблице 2.2.

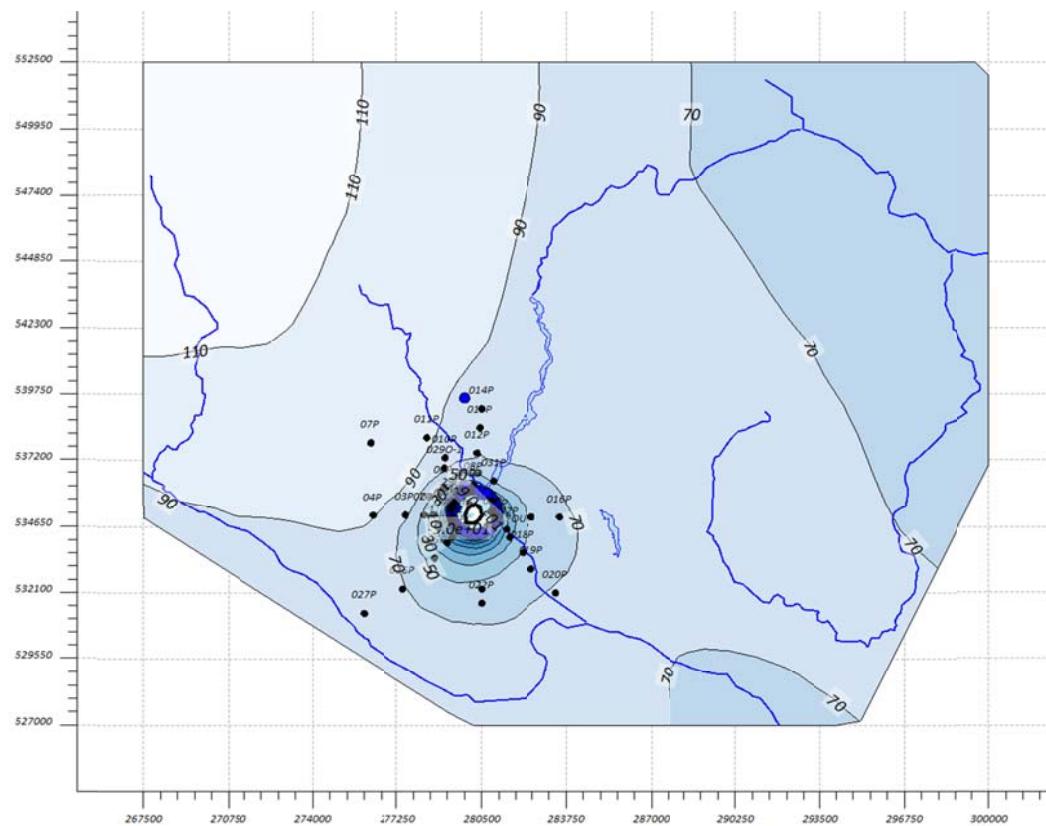


Рисунок 2.2 – Схема изолиний расчетных напоров в падунском водоносном комплексе на 31.12.2023 (4384 сутки от начала расчета 13 стресс-период)

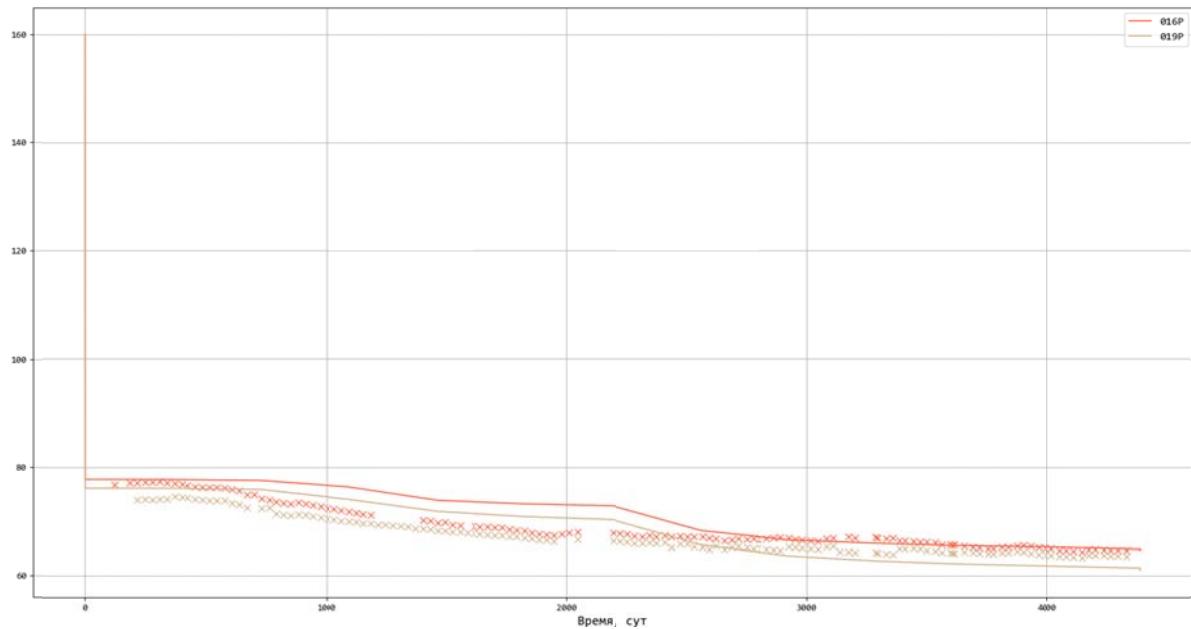


Рисунок 2.3 – Хронологический график изменения рассчитанных с помощью модели (сплошная линия) и фактические (точки на графике на дату наблюдений) уровни воды в скважинах №№16р и 29р

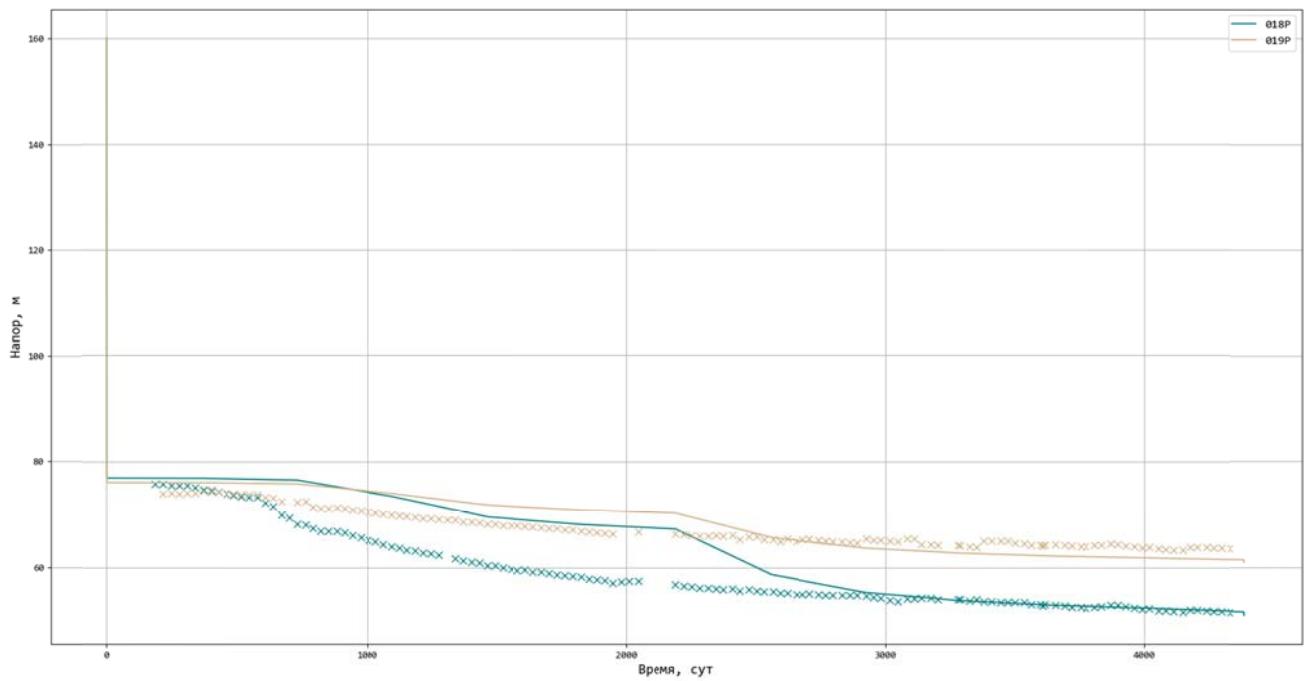


Рисунок 2.4 – Хронологический график изменения рассчитанных с помощью модели (сплошная линия) и фактические (точки на графике на дату наблюдений) уровни воды в скважинах №№18р и 19р

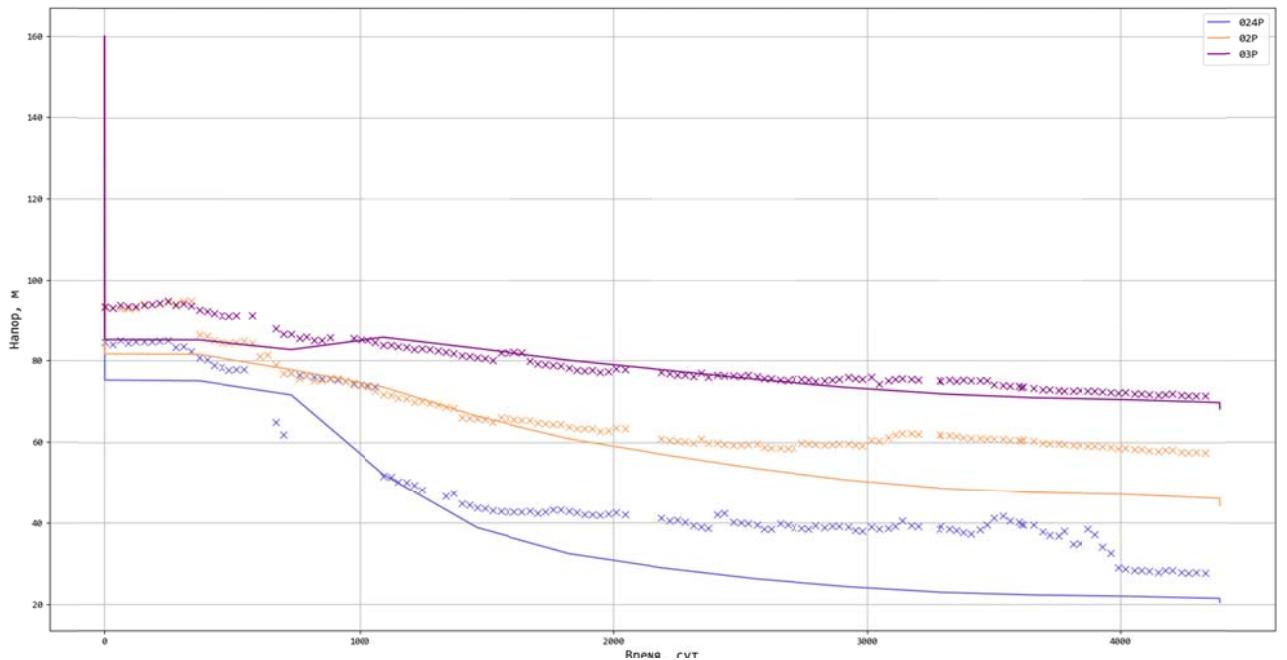


Рисунок 2.5 – Хронологический график изменения рассчитанных с помощью модели (сплошная линия) и фактические (точки на графике на дату наблюдений) уровни воды в скважинах №№02р, 03р и 24р

Таблица 2.2 – Принятые параметры и результаты расчета питания для рек и озер

Река	Расчетный коэффициент фильтрации, м/сут	Приток (–)/отток (+) в реки из водоносных горизонтов, м ³ /сут	
		1 сутки (фоновые величины)	4384 сутки (31.12.2023)
р. Верхотина	0,6	-16910	-15036
р. Волчья	0,6	-35313	-34498
р. Кукомка	3	-7600	-8032
руч. Нижний Грубый	0,9	-10706	-11026
оз. Черное	1÷10	9434	19082
р. Мегра	10	-95678	-94625
р. Ерна	10	-56904	-46225
р. Падун	10	-32446	-15839
Озеро	Коэффициент перетока 1/сут	Приток (+)/отток (–) в/из озера из водоносных горизонтов, м ³ /сут	
		1 сутки (фоновые величины)	4384 сутки (31.12.2023)
оз. Волчье	0,07	-34090	30627

Из представленных результатов моделирования видно, что в целом, расчетные напоры соответствовали фактическим. Но в районе скважин 18р и 19р они значительно отличались от фактических в период до 2018 года (время от начала расчета 2558 сут). В скважине 24р расчетные уровни отличались от фактических и после 2018 года.

При постоянных коэффициентах модели достичь достаточно полного соответствия фактических и расчетных уровней (напоров), а главное, соответствия величины водопритока в карьер и фильтрационных потерь, не удалось. Причина, прежде всего, в объеме фильтрационных потерь из озер Волчье и Черное и изменениях конфигурации карьера (см. также раздел 4.1).

На рисунке 2.6 представлен график измеренных фильтрационных потерь на участке между гидропостами ГС-1 и ГС-2 и в районе ГС-3 (см. рисунок 2.1). Из рисунка 2.6 видно, что, во-первых, у величины среднегодовых фильтрационных потерь изменяется знак, во-вторых, она существенно (в разы) изменяется во времени, в-третьих, что фактические фильтрационные потери на оз. Волчьеем 31.12.2023 были близки к нулю, что не соответствует рассчитанным потерям стока по геофильтрационной модели (30,6 тыс. м³/сут, таблица 2.2).

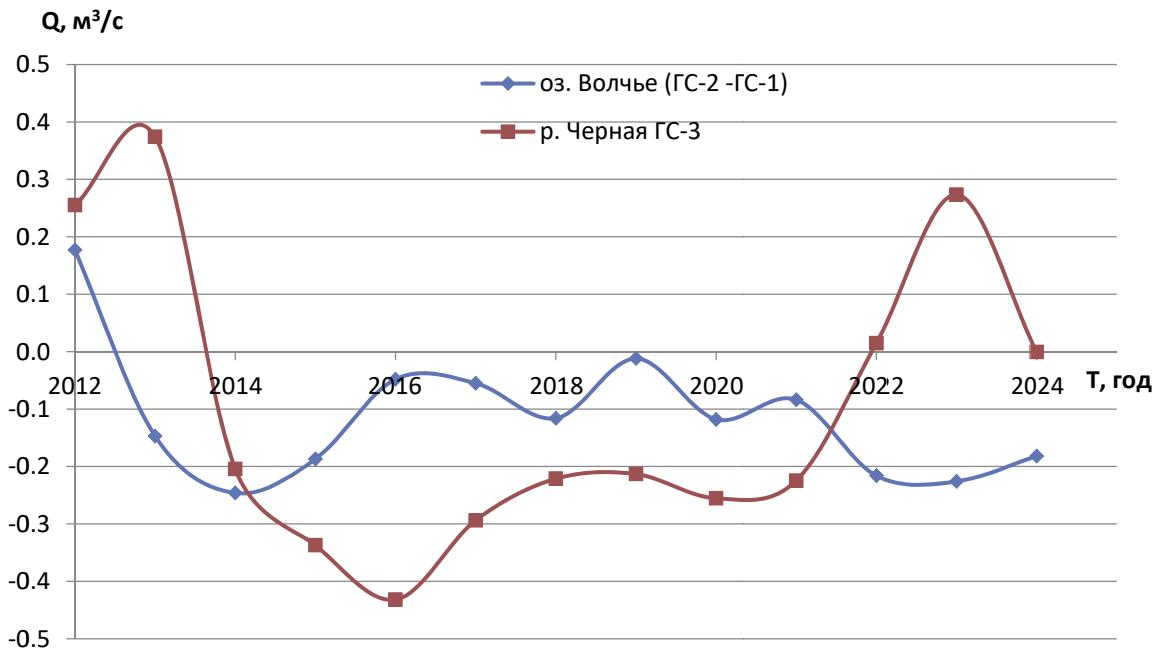


Рисунок 2.6 – Хронологический график подземного питания озер Волчье и Черное, полученный по данным гидрометрических наблюдений

Для оценки чувствительности модели к изменению величины подземного питания рек были выполнены расчеты при различном расчетном коэффициенте фильтрации сегмента реки (в терминах программного комплекса НИМФА), которым задано оз. Черное. Результаты расчетов представлены на рисунках 2.7–2.9.

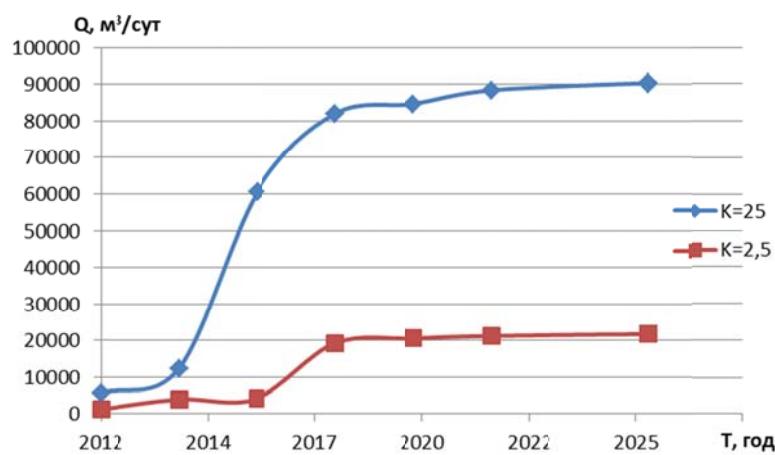


Рисунок 2.7 – Фильтрационные потери из Черное при коэффициенте фильтрации сегмента реки K=25 и K=2,5 м/сут

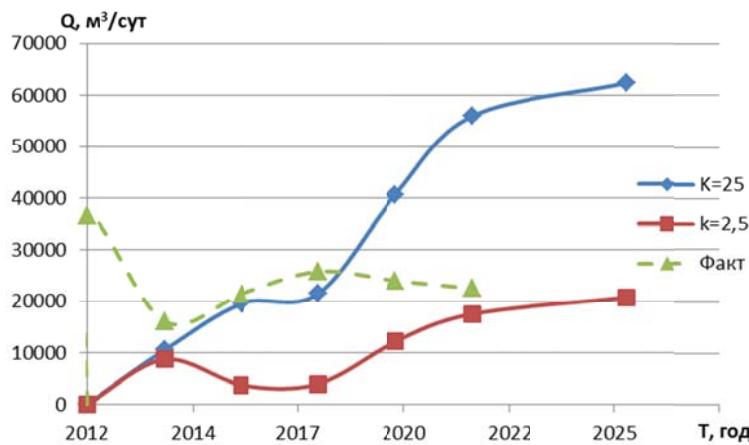


Рисунок 2.8 – Водоприток в карьер фактический и модельный при коэффициенте фильтрации сегмента реки Черная $K=25$ и $K=2,5$ м/сут

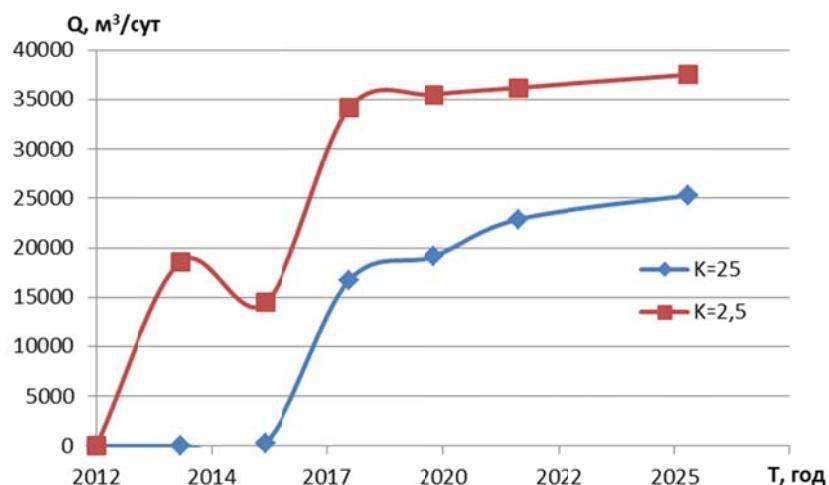


Рисунок 2.9 – Фильтрационные потери из оз. Волчье при коэффициенте фильтрации сегмента реки Черная $K=25$ и $K=2,5$ м/сут

Из графиков, представленных на рисунках 2.7–2.9, видно, что:

- при расчетном коэффициенте фильтрации оз. Черного (коэффициенте фильтрации сегмента реки, которым представлено оз. Черное) $K=25$ м/сут водоприток в карьер соответствует фактическому до 2018–2019 гг., после этого, расчетный (прогнозный) приток превышает фактический в три раза и достигает значений 60 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$;

- при расчетном коэффициенте фильтрации сегмента р. Черной $K=2,5$ м/сут водоприток в карьер соответствует фактическому после 2018–2019 гг. до этого времени расчетный приток существенно занижен;
- фильтрационные потери, как и водоприток в карьер, соответствуют фактическим, наблюдаемым значениям до 2018–2019 гг. при $K=25$ м/сут, после 2018–2019 гг. – при $K=2,5$ м/сут;
- при уменьшении расчетного коэффициента фильтрации сегмента р. Черной с $K=25$ м/сут до $K=2,5$ м/сут увеличиваются фильтрационные потери из Волчьих озер. В частности, в период после 2018-2019 гг., они выросли с 20–25 тыс. м³/сут до 35–37 тыс. м³/сут.

Кроме того, вариант модели, при котором для периода до 2018–2019 гг. расчетный коэффициент фильтрации оз. Черного (сегмента реки) был задан значением 10 м/сут, а после этого периода значением 2 м/сут показал, что при таком переменном коэффициенте фильтрации сегмента реки на модели удается воспроизвести фактический характер изменения водопритока.

Из этого можно сделать следующий вывод. После начала строительства карьера и реализации дренажных мероприятий, связанных с отведением стока р. Кукомки в Волчий озеро, осушением северной части озера Черного и организации сброса в озера дренажных вод со средним расходом 1,35 м³/с, фильтрационное сопротивление озера Черного (сегмента реки) стало возрастать. Наиболее вероятно, что изменение фильтрационного сопротивления вызвано колымацией дна озера взвесями, принесёнными дренажными водами. Но на снижение расхода фильтрационных потерь могли повлиять и некоторые процессы в осушенней, северной, части озера. К таким процессам можно отнести: фильтрацию из верхнего бьефа пруда-отстойника вод с высокой мутностью и, как следствие, колымацию высокопроводящих отложений в палеодолине; снижение водопроводимости на участке палеодолины за счёт её осушения скважинами ВПС (в восточном секторе контура).

В целом, результаты расчетов свидетельствуют о том, что процессы в оз. Черном и его палеодолине, которые в геофильтрационной модели интерпретируются, как изменение фильтрационного сопротивления, значительно определяют величину водопритока в карьер. При относительно высокой гидравлической связи оз. Черного с подземными водами, водоприток в карьер в последнем стресс-периоде мог бы достигать значений 60–70 тыс. м³/сут. При уменьшении расчетного коэффициента фильтрации сегмента р. Черной до 0 м/сут расчетный водоприток в карьер составил бы 13–16 тыс. м³/сут. Если при этом также до нуля уменьшить коэффициент перетока из оз. Волчье, то приток в карьер составил бы 5 тыс. м³/сут, при $K=2$ м/сут – 25–30 тыс. м³/сут. Таким образом, достичь полного соответствия прогнозных и фактических значений водопритока в карьер и фильтрационных потерь из озер Черное и Волчье можно изменения фильтрационное сопротивление сегмента р. Черная (расчетного коэффициента фильтрации). Гидравлическая связь между подземными и поверхностными водами в районе карьера является одной из основных характеристик, определяющих водоприток в него.

Задача сравнения модели с сосредоточенными параметрами и геофильтрационной моделью, в которой водоемы заданы с переменным фильтрационным сопротивлением, интересная. Но на данном этапе исследования целесообразно сосредоточится на более распространенных и более простых для анализа изменений на водосборе: глубине карьера и дебите водопонижающего контура. Поэтому в качестве тестовой модели был принят ее предварительный вариант, без переменного фильтрационного сопротивления. Возможность же точных прогнозов при обоснованных изменениях фильтрационного сопротивления сегмента р. Черной, в этом случае – лишь важное подтверждение соответствия геофильтрационной модели реальным гидрогеологическим условиям.

2.1.5 Тестовая численная геофильтрационная модель

Для оценки эффективности и границ применения модели формирования стока с сосредоточенными параметрами для прогнозов водопритока к карьерам (подземного стока с водосбора) было создано несколько вариантов тестовой геофильтрационной модели для прогноза среднемесячных и годовых значений водопритока с разной степенью вскрытия карьером толщи пород, различной интенсивностью инфильтрационного питания и работой водопонижающего дренажного контура вокруг карьера.

Расчет проводился для годовых и среднемесячных значений водопритока. В модели для расчета (прогноза) годовых значений водопритока было предусмотрено четырнадцать стресс-периодов. Первый период стационарный, восстанавливающий фоновый режим. Остальные стресс-периоды нестационарные, с одним шагом по времени продолжительностью 1 год, с 2012 по 2023 гг.

В модели для расчета (прогноза) среднемесячных значений водопритока был предусмотрен шестьдесят один стресс-период. Первый период стационарный, восстанавливающий фоновый режим. Остальные стресс-периоды нестационарные, с одним шагом по времени, продолжительностью 1 месяц с января 2012 по декабрь 2016 гг.

Было предусмотрено два варианта задания карьера в модели. Первый вариант – карьер вскрыл всю мощность четвертичных отложений (первый слой модели). Второй вариант – карьером вскрыта толща пород до подошвы падунских отложений (с первого по пятый слои модели). Карьер был задан с первого стресс периода.

В качестве инфильтрационного питания заданы атмосферные осадки по данным метеостанции Кепино (годовая или месячная сумма), умноженные на коэффициент инфильтрационного питания, принятый равным 0,25 (см. приложение Б). В тестовой модели для расчета (прогноза) среднемесячных значений водопритока использовалось два варианта задания инфильтрационного

питания. В первом варианте все осадки считались жидкими (снегонакопления нет). Во втором варианте инфильтрационное питание с ноября по апрель, принималось равным нулю. Все выпавшие осадки поступали на водосбор в течение мая месяца.

Созданы следующие варианты тестовой модели:

- прогноз (расчет) годовых значений водопритока (шаг по времени год), карьер вскрыл четвертичные отложения (1 слой модели);
- прогноз (расчет) годовых значений водопритока (шаг по времени год), карьер вскрыл падунские отложения (1–5 слои модели);
- прогноз (расчет) среднемесячных значений водопритока (шаг по времени месяц), карьер вскрыл четвертичные отложения, осадки заданы без учета снегонакопления;
- прогноз (расчет) среднемесячных значений водопритока (шаг по времени месяц), карьер вскрыл падунские отложения, осадки заданы без учета снегонакопления;
- прогноз (расчет) среднемесячных значений водопритока (шаг по времени месяц), карьер вскрыл четвертичные отложения, осадки заданы с учетом снегонакопления;
- прогноз (расчет) среднемесячных значений водопритока (шаг по времени месяц), карьер вскрыл падунские отложения, осадки заданы с учетом снегонакопления.

Дополнительно, для оценки влияния дренажной системы карьера на оправдываемость прогнозов с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами при расчете среднемесячного водопритока, был создан вариант геофильтрационной модели с действующим контуром водопонижающих скважин (ВПС) вокруг карьера. Он был обустроен на 2–5 слои модели (водоносные горизонты, приуроченные к олмуго-окуневским, урзугским и падунским отложениям) с общим постоянным расходом $147000 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Все варианты геофильтрационной модели наглядно представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Варианты геофильтрационной модели

	Карьер вскрыл четвертичные отложения	Карьер вскрыл падунские отложения
1. Прогноз среднегодового притока	+	+
2. Прогноз среднемесячного притока		
2.1 Осадки заданы без учета снегонакопления	+	+
2.2. Осадки заданы с учетом снегонакопления	+	+
2.3. Осадки заданы с учетом снегонакопления. Работает водопонижающий контур вокруг карьера	+	+

2.1.6 Прогноз водопритока к карьеру с помощью тестовой численной геофильтрационной модели.

Результаты расчета (прогноза) годового водопритока в карьер по всем вариантам тестовой геофильтрационной модели (таблица 2.3) представлены на рисунках 2.10 – 2.13. Всего было создано восемь вариантов геофильтрационной модели.

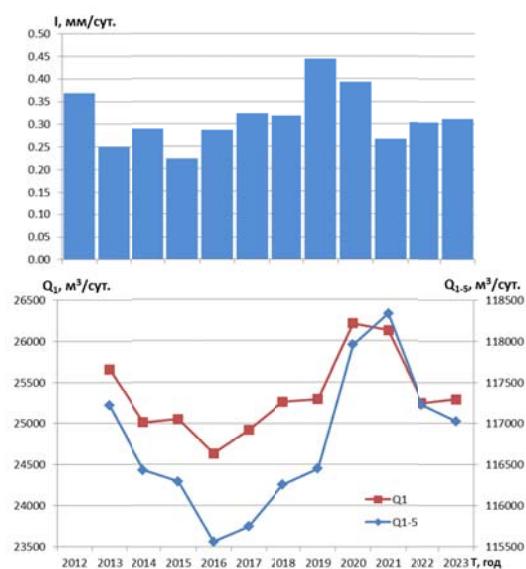


Рисунок 2.10 – Модельные значения годового водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные (Q_1) и падунские отложения (Q_{1-5}) при заданном инфильтрационном питании (I)

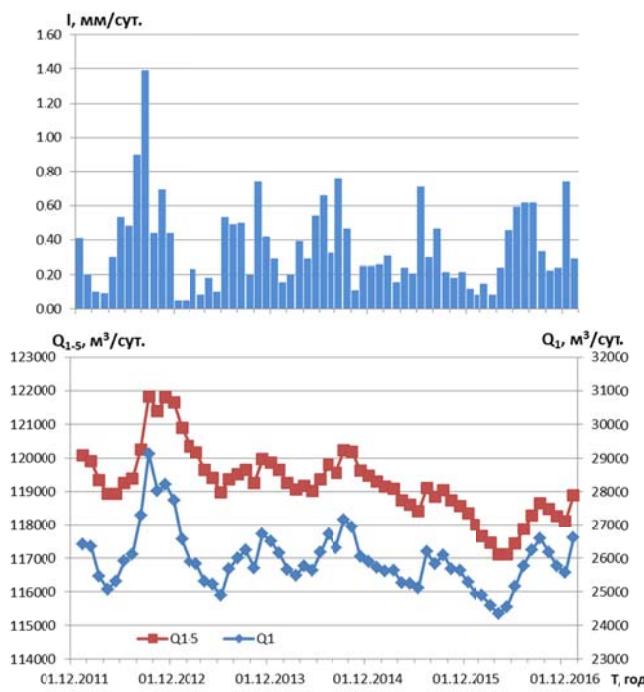


Рисунок 2.11 – Модельные значения водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные (Q_1) и падунские отложения (Q_{1-5}) при заданном инфильтрационном питании без учета снегонакопления (I)

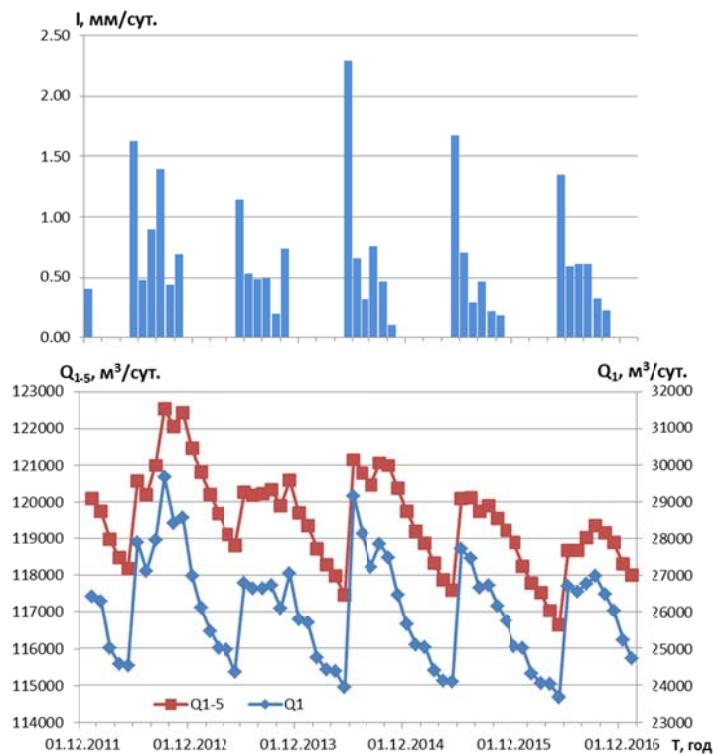


Рисунок 2.12 – Модельные значения водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные (Q_1) и падунские отложения (Q_{1-5}) при заданном инфильтрационном питании с учетом снегонакопления (I)

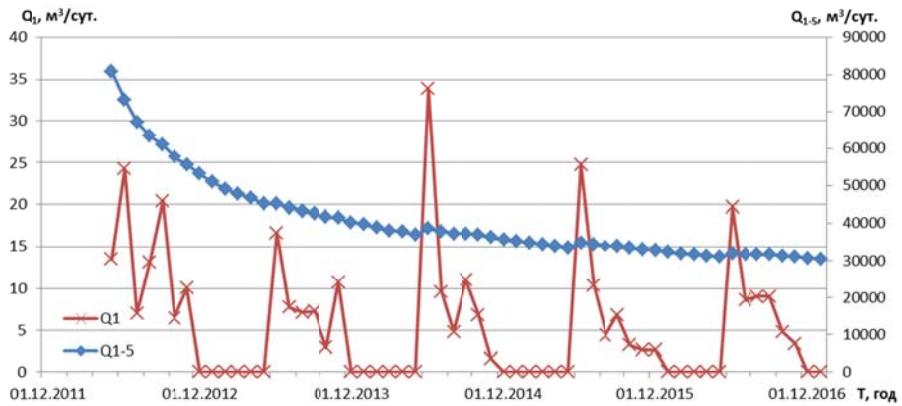


Рисунок 2.13 – Модельные значения водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные (Q_1) и падунские отложения (Q_{1-5}) при заданном инфильтрационном питании с учетом снегонакопления при работающем контуре водопонижающих скважин

2.2 Модель формирования стока с сосредоточенными параметрами для карьерного поля трубы им. В. Гриба

С помощью геофильтрационной модели карьерного поля трубы имени В. Гриба получены два расчетных (прогнозных) ряда годовых значений притока к карьеру (рисунок 2.12). Первый вариант соответствует вскрытию карьером четвертичных отложений (1 слой геофильтрационной модели), второй – вскрытию падунских отложений (1–5 слои геофильтрационной модели).

Также получены шесть расчетных (прогнозных) рядов среднемесячных значений притока к карьеру, при разных условиях вскрытия трубы карьером и величинах инфильтрационного питания (раздел 2.1).

Для каждого из полученных рядов водопритока (вариантов) были созданы модели формирования стока с сосредоточенными параметрами (см. раздел 1.4). В качестве входа в модели использовались те же ряды инфильтрационного питания, что задавались в соответствующие геофильтрационные модели. Для каждого ряда водопритока было создано по два варианта модели формирования стока в численной реализации вида (1.5): первая – с постоянными коэффициентами

$(a = \frac{\Delta t}{\tau} = const, b = \frac{1}{k} = const)$, вторая – с постоянным временем добегания и коэффициентом стока, зависящим от водопритока $(a = \frac{\Delta t}{\tau} = const, b = \frac{1}{k} = f(Q))$. Для годовых значений шаг по времени и заблаговременность прогноза составляли 1 год. Для прогноза среднемесячных значений шаг по времени и заблаговременность прогноза составляли 1 месяц.

2.2.1 Прогноз годового водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами.

Результаты прогноза годовых значений водопритока по модели формирования стока с сосредоточенными параметрами с постоянными коэффициентами, выполненные по методике, изложенной в разделе 1.4.2, представлены в таблице 2.4 и на рисунках 2.14–2.15. В таблице 2.4 представлены параметры моделей, полученные в результате идентификации, а на рисунках 2.14–2.15 прогнозные и фактические (рассчитанные с помощью геофильтрационной модели) изменения водопритока во времени. Из этих рисунков и таблицы видно, что при постоянных коэффициентах модели формирования стока, прогнозы для годового притока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, можно отнести к категории «удовлетворительных» ($0,6 < S/\delta < 0,8$), а для карьера, вскрывшего падунские отложения – к категории «хороших» [22].

Результаты прогноза годовых значений водопритока, выполненные по модели формирования стока (1.3) с коэффициентом b , линейно зависящим от водопритока, представлены в таблице 2.5 и на рисунках 2.16 – 2.17. Из этих рисунков и таблицы видно, что при коэффициенте b , линейно зависящим от величины водопритока ($Q_{вд}$), оправдываемость прогнозов существенно выросла. Для модели карьера в четвертичных отложениях точность прогнозов по критерию S/δ составила 0,28, а для карьера в падунских отложениях – $S/\delta=0,16$. При этом все отклонения (100%) находились в диапазоне 0,674δ. Такие прогнозы можно признать, относящимися к категории «отличных».

Таблица 2.4 – Характеристики модели формирования стока для прогноза годового водопритока при постоянных коэффициентах

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	13,3020006869	21,6888767570
b	0,0056067944	0,0012020551
S	297,2	322,9
δ	444,4	793,7
δ_Δ	484,8	709,1
S/δ	0,669	0,407
S/δ_Δ	0,613	0,455
$0,674\delta$	75,0%	91,7%

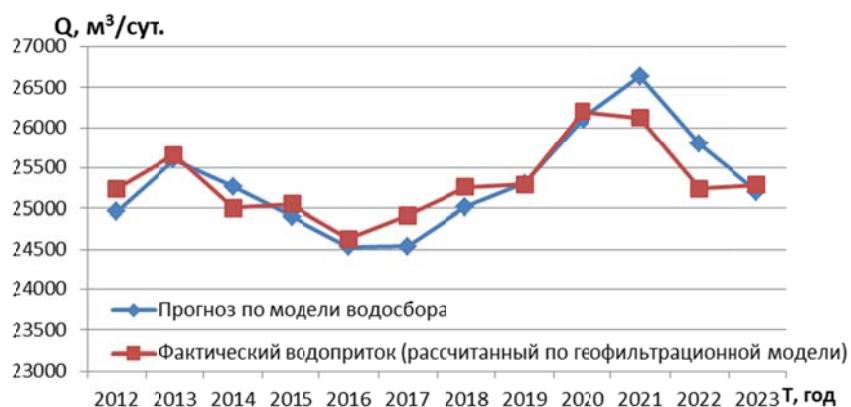


Рисунок 2.14 – Прогнозные и фактические значения годового водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при постоянных коэффициентах модели

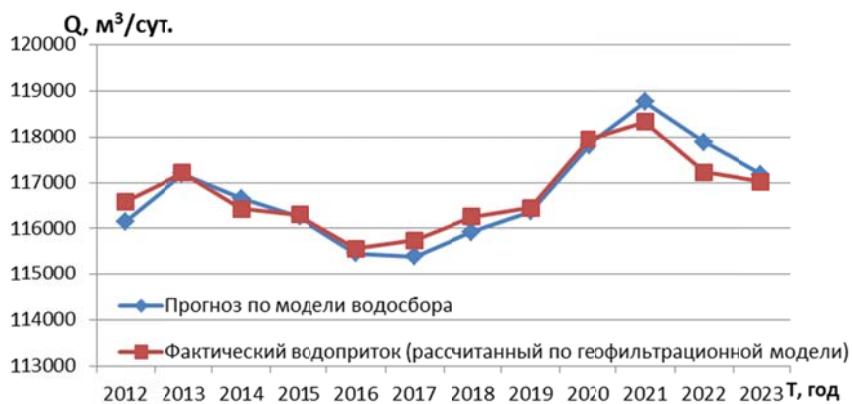
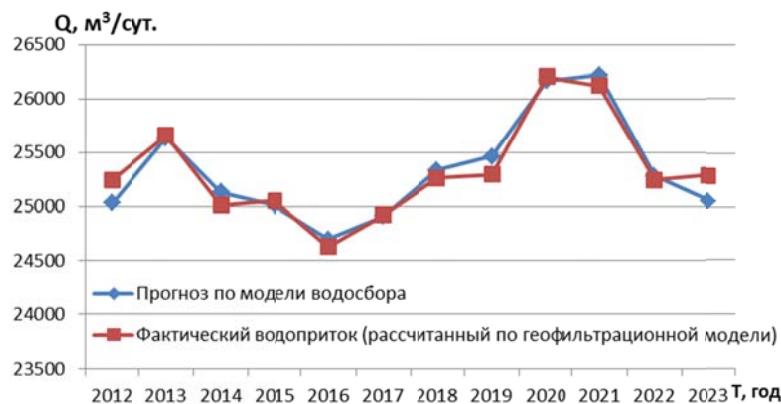


Рисунок 2.15 – Прогнозные и фактические значения годового водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при постоянных коэффициентах модели

Таблица 2.5 – Характеристики модели формирования стока для прогноза годового

$$\text{водопритока при } a = \frac{\Delta t}{\tau} = \text{const} \text{ и } b = \frac{1}{k} = f(Q)$$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
<i>a</i>	12,7628074747	21,6149249793
<i>b</i>	0,0000010042 · $Q_{\text{вд}}$ - 0,1116288	0,0000001428 · $Q_{\text{вд}}$ - 0,01547142
<i>S</i>	124,2	123,7
δ	444,4	793,7
δ_Δ	484,8	709,1
<i>S</i> / δ	0,280	0,156
<i>S</i> / δ_Δ	0,256	0,174
0,674 δ	100,0%	100,0%

Рисунок 2.16 – Прогнозные и фактические значения годового водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при коэффициенте $b=f(Q_{\text{вд}})$ Рисунок 2.17 – Прогнозные и фактические значения годового водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при коэффициенте $b=f(Q_{\text{вд}})$

2.2.2 Прогноз среднемесячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами для условий без снегонакопления

На территории России можно выделить районы с различными условиями формирования инфильтрационного питания [5]: снеговое и дождевое, районы с засушливым климатом и с приходом интенсивных осадков (тайфунов) и т.п. Поэтому для тестирования модели формирования стока рассмотрим два варианта задания внешнего воздействия: первый – с осадками, заданными без учета снегонакопления, второй – с учетом снегонакопления, чтобы смоделировать условия с относительно постоянным инфильтрационным питанием и периодами его относительно высокой интенсивности и отсутствия.

Результаты прогноза среднемесячных значений водопритока по методике, основанной на модели (1.3) при внешнем воздействии (осадках), характерном для условий без снегонакопления (рисунок 2.11, приложение Б), представлены в таблицах 2.6 и 2.7 и на рисунках 2.18 – 2.21. В таблице 2.6 и на рисунках 2.18 – 2.19 представлены результаты прогнозов по модели формирования стока с постоянными коэффициентами, в таблице 2.7 и рисунках 2.20 – 2.21 – с переменными.

Из этих рисунков и таблицы видно, что при постоянных коэффициентах модели формирования стока, прогнозы среднемесячного водопритока к карьерам, вскрывшим четвертичные и падунские отложения, можно отнести к категории “хороших” ($S/\delta < 0,6$).

Как и для прогнозов годовых значений водопритока, оправдываемость прогнозов для карьера, вскрывшего падунские отложения (1–5 слои модели), была выше, чем для карьера, вскрывшего только четвертичные отложения (первый слой). Из таблицы 2.7 и рисунков 2.20 – 2.21, на которых представлены результаты прогнозов по модели формирования стока с переменным коэффициентом стока ($b = \frac{1}{k} = f(Q)$) видно, что применение переменного коэффициента снизило ошибку прогнозов (по критерию S/δ) в 1,5 – 2,5 раза.

В целом, точность прогнозов среднемесячных значений водопритока в несколько раз выше, чем для годового. Критерий S/δ для модели с постоянными коэффициентами составил 0,12–0,33, а для модели с переменным коэффициентом стока – 0,08–0,13.

Таблица 2.6 – Характеристики модели формирования стока для прогноза

среднемесячного водопритока при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и $b = \frac{1}{k} = const$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	66,89792195	53,7565502
b	0,000421224	0,0000942
S	285,6	124,2
δ	876,1	1029,1
δ_Δ	572,4	420,8
S/δ	0,326	0,121
S/δ_Δ	0,499	0,295
$0,674\delta$	98,4%	100,0%



Рисунок 2.18 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при постоянных коэффициентах модели



Рисунок 2.19 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при постоянных коэффициентах модели

Таблица 2.7. Характеристики модели формирования стока для прогноза

среднемесячного водопритока при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = \text{const}$ и $b = \frac{l}{k} = f(Q)$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	72,12239949	53,7741025
b	$0,0000001545 \cdot Q_{\text{вд}} - 0,0035996$	$0,0000000136 \cdot Q_{\text{вд}} - 0,00153008$
S	115,0	84,7
δ	876,1	1029,1
δ_Δ	572,4	420,8
S/δ	0,131	0,082
S/δ_Δ	0,201	0,201
$0,674\delta$	100,0%	100,0%

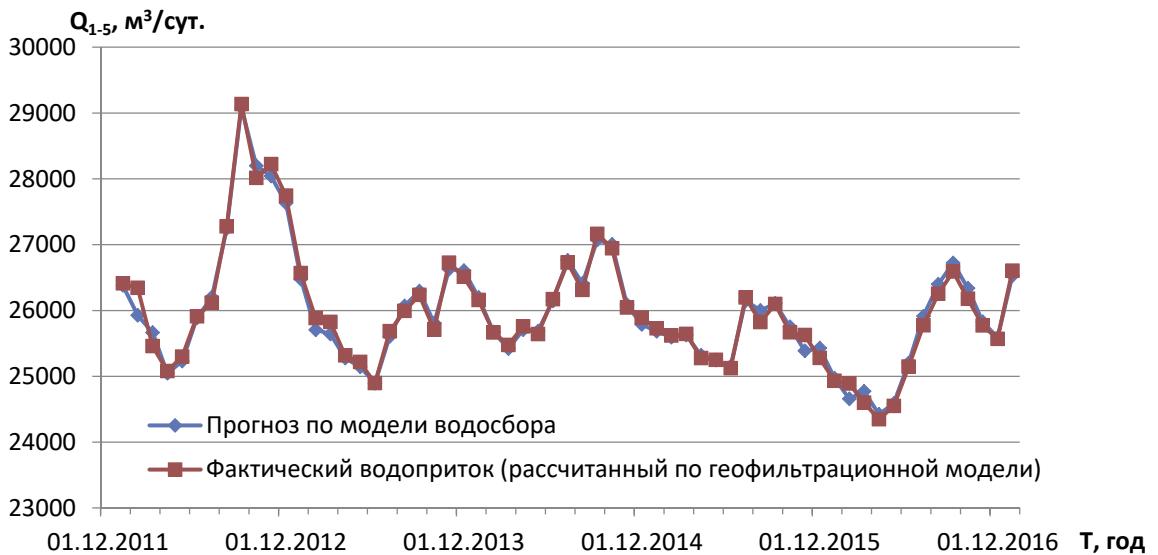


Рисунок 2.20 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при коэффициенте

$$b=f(Q_{\text{вд}})$$



Рисунок 2.21 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при коэффициенте

$$b=f(Q_{\mathrm{bd}})$$

2.2.3 Прогноз месячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами при осадках, заданных с учетом снегонакопления

Наиболее распространенные условия питания водоносных горизонтов в России характеризуются наличием снежного покрова в зимний период

(отсутствием инфильтрационного питания) и его интенсивным таянием в течение относительно короткого весеннего периода. Поэтому с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами были выполнены прогнозы величин среднемесячного водопритока в карьер для условий снегонакопления (рисунок 2.12, приложение Б).

Результаты расчетов, представлены в таблицах 2.8 и 2.9 и рисунках 2.22–2.23. В таблице 2.8 представлены параметры моделей, полученные в результате идентификации, а на рисунках 2.22–2.23 прогнозные и фактические (рассчитанные с помощью геофильтрационной модели) изменения водопритока во времени.

Таблица 2.8. Характеристики модели формирования стока для прогноза

среднемесячного водопритока при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и $b = \frac{l}{k} = const$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	73,14794525	55,58080771
b	0,000433836	0,0000938
S	559,6	263,2
δ	1414,8	1278,4
δ_Δ	1233,3	875,8
S/δ	0,395	0,206
S/δ_Δ	0,454	0,301
$0,674\delta$	95,1%	100,0%



Рисунок 2.22 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при постоянных коэффициентах модели

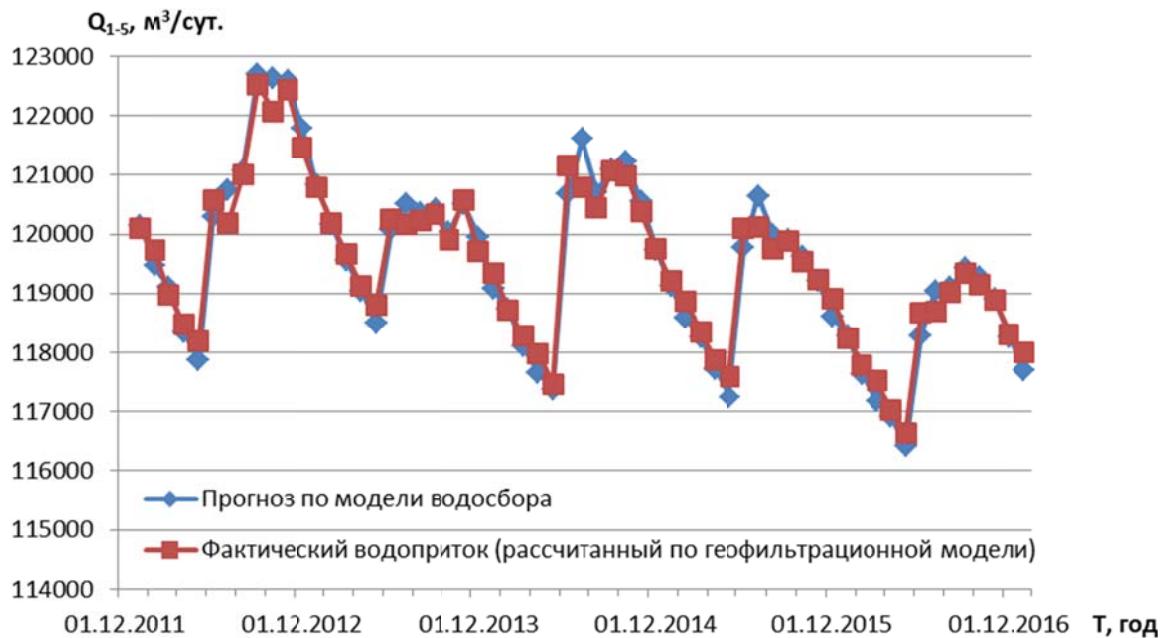


Рисунок 2.23 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при постоянных коэффициентах модели

Таблица 2.9. Характеристики модели формирования стока для прогноза

среднемесячного водопритока при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и $b = \frac{l}{k} = f(Q)$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	73,25894809	54,08937276
b	$0,0000001858 \cdot Q_{\text{вд}} - 0,0044384$	$0,0000000229 \cdot Q_{\text{вд}} - 0,00264375$
S	232,4	184,8
δ	1414,8	1278,4
δ_Δ	1233,3	875,8
S/δ	0,164	0,145
S/δ_Δ	0,188	0,211
$0,674\delta$	100,0%	100,0%



Рисунок 2.24 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при коэффициенте

$$b=f(Q_{\text{вд}})$$

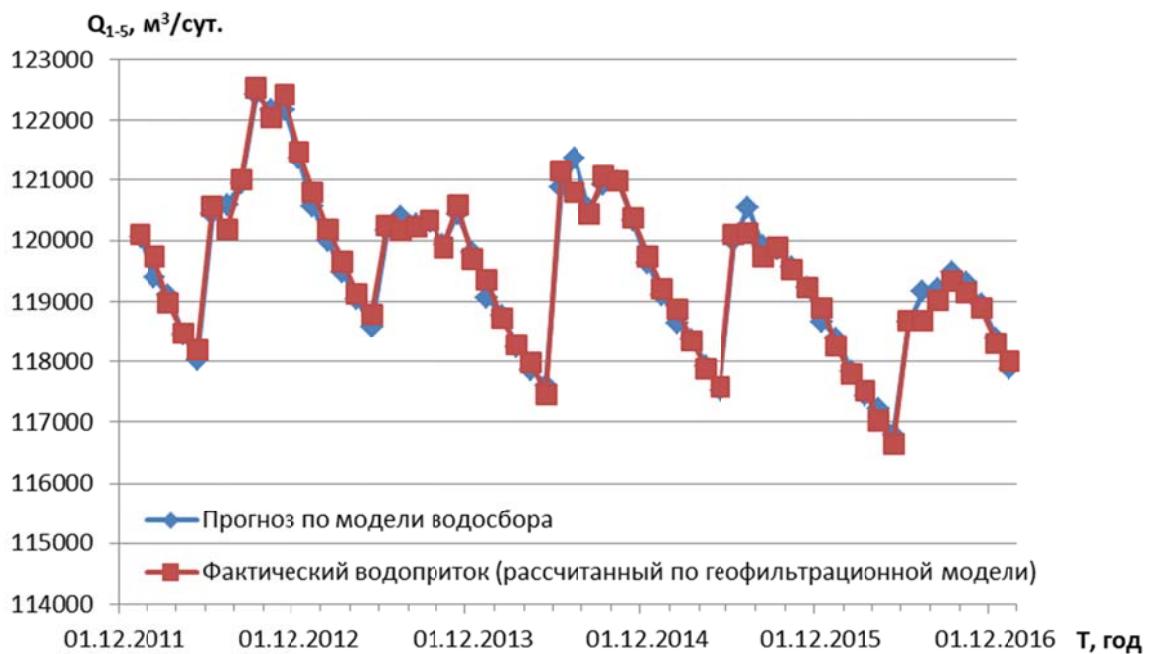


Рисунок 2.25 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при коэффициенте $b=f(Q_{вд})$

Из представленных графиков и таблиц видно, что прогнозы в условиях снегонакопления, отсутствия питания в зимний период и интенсивном снеготаянии весной в течение одного месяца, по точности практически не отличаются от прогнозов в условиях постоянного питания. При использовании переменного коэффициента $b = \frac{l}{k} = f(Q_{вд})$ оправдываемость прогнозов по критерию S/δ возросла с $0,20 \div 0,40$ до значений $0,14 \div 0,16$.

2.2.4 Прогноз среднемесячного водопритока к карьеру с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами при действующем контуре водопонижающих скважин

Разработка карьеров, как правило, сопровождается значительными техногенными изменениями гидрогеологических условий [18], это:

- собственно отработкой (углублением) карьера, которую можно схематизировать как рост дрены со временем [11, 40];

- комплексом дренажных мероприятий, призванных снизить уровни подземных вод в прибрежном массиве и уменьшить величину водопритока в карьер;
- созданием внутренних и внешних отвалов, которые могут быть схематизированы, как изменение свойств верхнего водоносного горизонта, или как новый горизонт, или как изменение условий питания (перераспределение поверхностного стока) и т.п.;
- созданием водозаборов подземных вод;
- наличием утечек из хвостохранилищ;
- рядом других техногенных факторов (планировкой дневной поверхности, строительством дорог, вырубкой леса и т.п.).

Состав дренажных мероприятий может быть разнообразным [30]. На трубке им. В. Гриба, для района которой создана тестовая геофильтрационная модель, в качестве основных дренажных мероприятий используется контур водопонижающих скважин (ВПС) и карьерный водоотлив (КВО). Поэтому из многообразия дренажных мероприятий для тестовой задачи был выбран именно контур водопонижающих скважин, который обустроен на водоносные горизонты, приуроченные к олмуго-окуневским, урзугским и падунским отложениям (2–5 слои модели) с общим средним расходом $147000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Контур задействован со второго стресс-периода.

Результаты прогнозов по модели формирования стока с сосредоточенными параметрами водопритока к карьерам, который, в свою очередь, был рассчитан (создан) на основании геофильтрационной модели, представлены в таблицах 2.10 – 2.11 и рисунках 2.26 – 2.29.

Из представленных графиков и таблиц видно, что работа мощного дренажного контура практически не повлияла на эффективность применения модели формирования стока с сосредоточенными параметрами. Критерий $S/\delta = 0,10 \div 0,24$ для варианта модели с постоянными коэффициентами и $S/\delta = 0,03 \div 0,21$ для варианта модели с коэффициентом $b = \frac{l}{k} = f(Q)$. Но следует обратить

внимание, что для карьера, приуроченного к падунским отложениям, в варианте модели с постоянными коэффициентами, критерий $S/\delta_{\Delta} = 0,78$. В подобной модели, но без работы водопонижающего контура, $S/\delta_{\Delta} = 0,30$. Очевидно, это связано с влиянием откачки из контура ВПС и глубиной карьера. При мощном дренажном воздействии ($147000 \text{ м}^3/\text{сут}$) и осушении верхних водоносных горизонтов водоприток в карьер определяется относительно глубоко залегающим водоносным комплексом, приуроченным к падунской свите венда. Сезонная изменчивость величины водопритока из этого горизонта мала по сравнению с понижением, вызванным дренажным контуром (рисунки 2.27 и 2.29). Изменчивость водопритока, которую можно охарактеризовать величиной δ_{Δ} (среднее квадратическое отклонение изменений переменной за период заблаговременности прогноза) [22], для водопритока в карьер, приуроченного к падунским отложениям будет значительно ниже, чем для четвертичных. Соответственно критерий оправдываемости (целесообразности) S/δ_{Δ} для карьера, вскрывшего падунские отложения выше. Другими словами, вклад воздействия дренажной системы на величину водопритока значительно выше сезонных изменений, которыми можно пренебречь (рисунки 2.27 и 2.29).

Таблица 2.10 – Характеристики модели формирования стока для прогноза среднемесячного водопритока при действующем контуре ВПС, при постоянных коэффициентах

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	0,47709	21,74581
b	1,99798	0,00173
S	1,801	1292,2
δ	7,531	12731,1
δ_{Δ}	9,093	1657,1
S/δ	0,24	0,101
S/δ_{Δ}	0,198	0,780
$0,674\delta$	98,2%	100,0%



Рисунок 2.26 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при постоянных коэффициентах модели

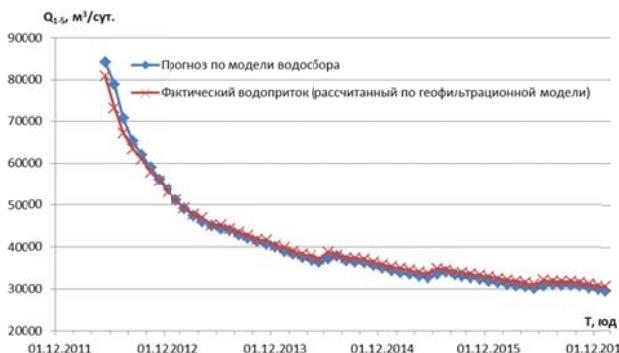


Рисунок 2.27 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при постоянных коэффициентах модели

Таблица 2.11. Характеристики модели формирования стока для прогноза среднемесячного водопритока при действующем контуре ВПС. $a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и

$$b = \frac{l}{k} = f(Q_{вд})$$

Характеристика	Модель карьера в четвертичных отложениях	Модель карьера в падунских отложениях
a	0,47315	21,12586
b	$-0,0000107534 \cdot Q_{вд} + 2,52377$	$0,0000000743 \cdot Q_{вд} - 0,00198$
S	1,604	432,8
δ	7,531	12731,1
δ_Δ	9,093	1657,1
S/δ	0,213	0,034
S/δ_Δ	0,176	0,261
$0,674\delta$	98,2%	100,0%



Рисунок 2.28 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, при коэффициенте

$$b=f(Q_{\text{вд}})$$



Рисунок 2.29 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к карьеру, вскрывшему падунские отложения, при коэффициенте

$$b=f(Q_{\text{вд}})$$

2.3. Сравнение и анализ результатов численного эксперимента водопритока к карьеру

Величины оправдываемости прогнозов водопритока к карьеру, выданные с помощью модели формирования стока (1.3) для всех рассмотренных вариантов представлены в сводной таблице 2.12

Таблица 2.12 – Сводная таблица оправдываемости прогнозов по критерию S/δ для разработанных вариантов модели формирования стока с сосредоточенными параметрами

	Карьер вскрыт четвертичные отложения	Карьер вскрыт падунские отложения
1. Прогноз среднегодового притока		
$b = const$	0,67	0,41
$b=f(Q_{\text{вд}})$	0,28	0,16
2. Прогноз среднемесячного притока		
2.1 Осадки заданы без учета снегонакопления $b=const$	0,33	0,12
$b=f(Q_{\text{вд}})$	0,13	0,08
2.2. Осадки заданы с учетом снегонакопления $b=const$	0,40	0,21
$b=f(Q_{\text{вд}})$	0,16	0,14
2.3. Осадки заданы с учетом снегонакопления. Работает водопонижающий контур ВПС $b=const$	0,24	0,10
$b=f(Q_{\text{вд}})$	0,21	0,03

Из таблицы 2.12 видно, что оправдываемость как среднегодовых, так и среднемесячных прогнозов для притока к карьеру, вскрывшему четвертичные отложения, была в 2 и более раз выше, чем для притока к карьеру, вскрывшему падунские отложения. Наиболее вероятное объяснение этого заключается в безнапорном режиме движения подземных вод, приуроченных к четвертичным отложениям. Фильтрационные свойства безнапорного горизонта изменяются во времени при изменении его мощности. В трехмерной геофильтрационной модели этот процесс может быть соответствующим образом учтен. В модели формирования стока с сосредоточенными параметрами (с постоянными коэффициентами), подобные изменения учтены быть не могут. Изменение водопроводимости безнапорного водоносного горизонта при изменении уровней подземных вод, с точки зрения модели формирования стока (1.3), это изменение коэффициентов модели (свойств системы). Это предположение подтверждается

тем, что при введении в модель формирования стока (1.3) коэффициента стока, как линейной функции от водопритока (стока с водосбора), оправдываемость прогнозов для безнапорного водоносного горизонта выросла в 2–3 раза (см. таблицу 2.12). Улучшение оправдываемости прогнозов для напорного горизонта было менее значимым. Следует отметить, что введение переменного коэффициента незначительно (с $S/\sigma = 0,24$ до $S/\sigma = 0,21$) улучшило оправдываемость прогнозов при воздействии на режим подземных вод скважин водопонижающего контура. И хоть, в целом, такая оправдываемость прогнозов близка к «отличной», тем не менее, следует констатировать, что при достаточно сильном воздействии на режим безнапорных подземных вод, оправдываемость прогнозов по модели (1.3) может снижаться и не поддаваться улучшению за счет введения переменных коэффициентов.

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

1. Значения водопритоков в карьер, рассчитанные (полученные) с помощью геофильтрационной модели могут быть спрогнозированы с помощью модели формирования стока с сосредоточенными параметрами с высокой точностью (оправдываемостью).
2. Оправдываемость прогнозов среднегодовых значений водопритока с заблаговременностью один год при использовании модели формирования стока с постоянными коэффициентами можно отнести к категории «хороших» и «удовлетворительных» ($S/\delta=0,41\div0,67$).
3. При использовании для прогнозов среднегодовых значений водопритока модели формирования стока с коэффициентом b , линейно зависящим от величины водопритока, оправдываемость прогноза возрастает более чем в два раза ($S/\delta=0,16\div0,28$).
4. Оправдываемость прогнозов среднемесячных значений водопритока с заблаговременностью один месяц при использовании модели формирования

стока с постоянными коэффициентами можно отнести к категории «хороших» ($S/\delta=0,10\div0,40$).

5. Применение переменного коэффициента b в модели формирования стока с сосредоточенными параметрами для прогнозов среднемесячных величин водопритока позволило увеличить оправдываемость прогнозов в 1,5–3 раза ($S/\delta=0,03\div0,21$).
6. Оправдываемость прогнозов для карьера, вскрывшего напорные падунские отложения, в целом выше, чем для карьера, вскрывшего безнапорные четвертичные отложения. Связано это, прежде всего, с изменением фильтрационных свойств безнапорного водоносного горизонта при изменении уровней подземных вод.

Метод, основанный на модели (1.3), может быть применим для долгосрочных прогнозов водопритока к открытым горным выработкам.

2.4 Прогноз подземного питания р. Волчья.

Для оценки возможности учета в рассматриваемой модели с сосредоточенными параметрами техногенных изменений подземного питания рек был проведен численный эксперимент по прогнозу годового подземного питания р. Волчьей на участке от ГС–2 до ГС–1 (рис 2.1).

Для прогноза подземного питания реки Волчья использовалась геофильтрационная модель, созданная на основании фактических данных о внешних воздействиях: дебите откачки по контуру ВПС, изменению положения карьера, фильтрационного сопротивления рек и т.п. (см. разделы 2.1.3, 2.1.4). Следует отметить, что калибровка модели производилась, в том числе, по величине фонового подземного питания рек. Величина инфильтрационного питания задана постоянная во всей моделируемой области 146 мм/год. Как было отмечено ранее, геофильтрационная модель не может быть использована для долгосрочных прогнозов величины подземного питания рек из-за отсутствия данных наблюдений за ним. Поэтому разработанная модель показывает

изменение подземного питания рек при изменяющемся воздействии на режим подземных вод горных работ без учета сезонной и годовой изменчивости режима подземных вод.

Рассчитанное с помощью геофильтрационной модели подземное питание рек было принято за фактическое. Затем, был проведен его расчет (прогноз с заблаговременностью 1 год) с помощью методики, основанной на модели (1.3). Прогнозные и фактические (рассчитанные по геофильтрационной модели) значения годового подземного питания р. Волчей у г/п 1 представлены на рисунке 2.30. Оправдываемость прогноза по критерию S/δ составила 0,07, по критерию S/δ_Δ – 0,24. При этом коэффициенты модели (k, τ) являлись функциями от объема перехватываемых дренажных вод на контуре ВПС.

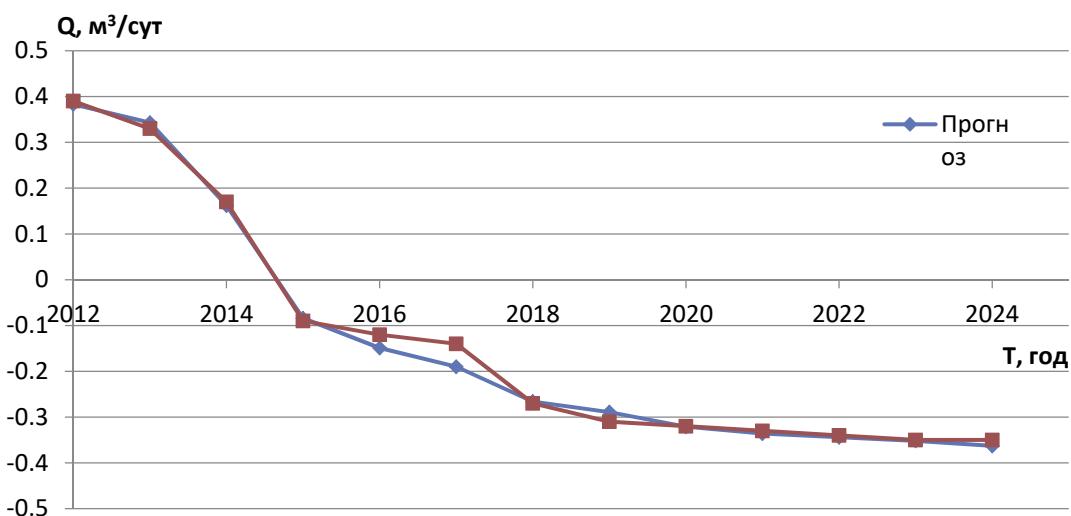


Рисунок 2.30 – Прогнозные и фактические значения годового подземного питания р. Волчей

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о том, что применение в модели формирования стока (1.3) переменных коэффициентов позволяет с ее помощью достаточно точно воспроизвести изменения подземного питания рек, спрогнозированные с помощью геофильтрационной модели. Метод, основанный на модели (1.3), может быть применим для долгосрочных прогнозов речного стока в условиях техногенного воздействия на него ГОК.

3. Апробация модели формирования стока с сосредоточенными параметрами. Расчет притока к действующим горным выработкам

Для апробации предлагаемой методики прогноза стока с водосбора для карьеров, в качестве объектов исследования выбраны Коашвинский, Ньоркпахский и Саамский карьеры, разрабатывающие месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. Причина выбора этих объектов в том, что, с одной стороны, они находятся в одинаковых климатических условиях, для расчетов используются данные одной и той же метеостанции. С другой стороны, они характеризуются разным соотношением подземного и поверхностного стока (водопритока) и находятся на разной стадии разработки. Наибольшая доля поверхностного стока в притоке к Саамскому карьеру, подземного – к Коашвинскому. Таким образом, в одном районе Хибинского массива можно оценить эффективность предлагаемой методики для различного соотношения подземного и поверхностного притока и разных стадий разработки карьера.

3.1 Краткое описание выбранных карьеров, разрабатывающих месторождение апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.

Коашвинский, Ньоркпахский и Саамский карьеры созданы для разработки месторождения апатит-нефелиновых руд, приуроченных к Хибинскому щелочному массиву, в центре Кольского полуострова. Схема расположения объектов исследования представлена на рисунке 3.1. Саамским карьером проводилась отработка месторождений Кукисвумчорр и Юкспор. Отработка месторождения Кукисвумчорр началась в 1929 г., а месторождения Юкспор – в 1954 г. К 1990 году отработка месторождений Кукисвумчорр и Юкспор велась открытым и подземным (Кировский рудник) способами. На сегодняшний день разработка Саамского карьера завершена. Водоотлив из карьера прекращен, но карьер не затоплен, дренируется действующим Кировским рудником.

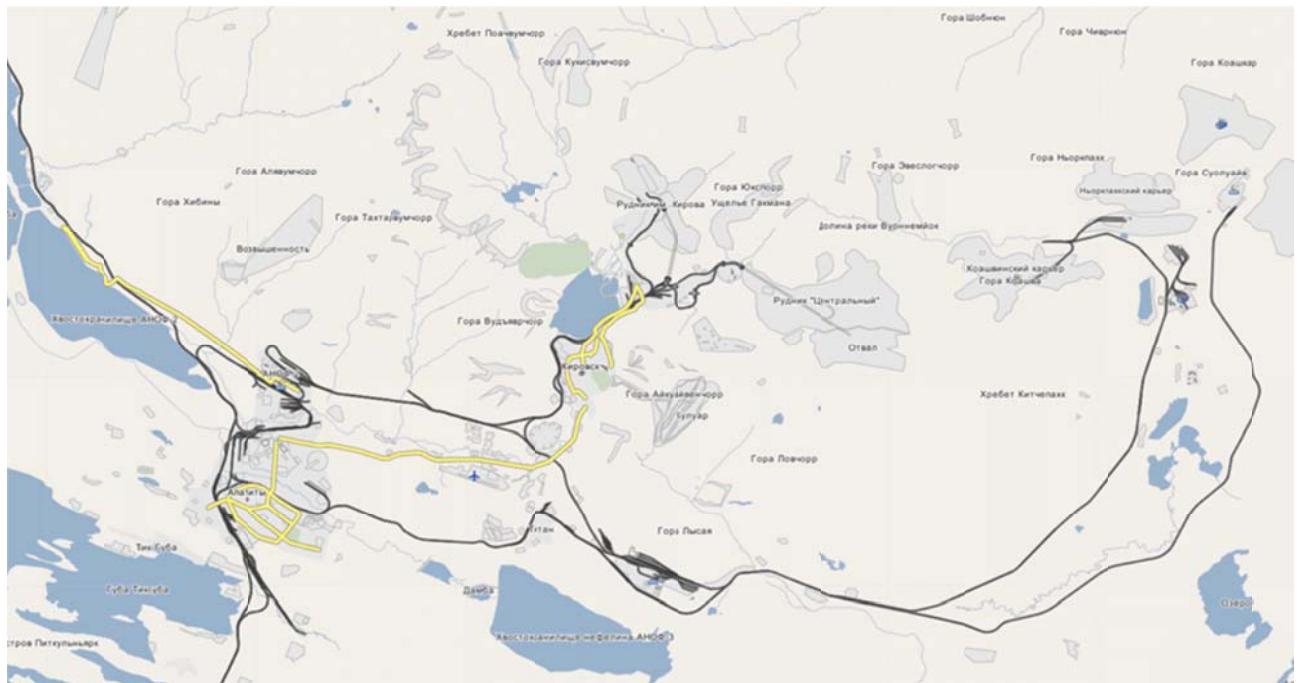


Рисунок 3.1—Схема расположения объектов исследования по данным электронного сервиса «Wikimapia» (2023 год)

Вскрытие Коашвинского карьера началось в 1979 году; введен в эксплуатацию в 1981 году. В том же году создан Восточный рудник, объединивший Коашвинский и создаваемый Ньорпахский карьеры. Ньорпахский карьер - введен в эксплуатацию в 1983 году. Карьеры разрабатываются по настоящее время.

Гидрометеорологические условия, в которых расположены карьеры, нехарактерны для территории России. Климат, расположенного в высоких широтах Кольского полуострова, находится под смягчающим влиянием океана в целом и северной ветви теплого течения Гольфстрим в частности. Представление о климатических условиях района можно получить из таблицы 3.1, где представлены характеристики климата по данные многолетних наблюдений горно-лавинной станции «Восточная» [31].

Таблица 3.1 – Характеристики климата по данные многолетних наблюдений горно-лавинной станции «Восточная»

	янв	фев	март	апр	май	июнь	июль	авг	сен	окт	нояб	дек	ГОД
Среднемесячная температура воздуха, °C	-10,8	-11,1	-6,6	-1,8	3,7	10,5	14,1	11,7	6,2	0,6	-5,7	-8,2	0,2
Абс. максимум температуры воздуха, °C	8,0	9,9	10,6	16,3	24,3	31,1	30,8	29,4	23,5	14,3	11,4	10,9	31,1
Абс. минимум температуры воздуха, °C	-39,8	-35,9	-26,8	-21,5	-14,0	-2,5	1,7	-0,8	-6,6	-15,7	-26,4	-31,7	-39,8
Среднемесячная относительная влажность, %	87	87	82	76	75	72	76	80	83	86	90	89	82
Среднемесячная скорость ветра, м/с	1,5	1,4	1,6	1,7	1,8	2,2	2,0	1,7	1,7	1,7	1,4	1,5	1,7
Максимальные порывы ветра, м/с	24	28	25	22	22	—	—	—	—	25	22	25	28
Среднегодовая сумма осадков, мм	66,5	61,7	59,9	47,6	53,0	55,2	89,6	74,7	93,1	94,7	80,6	81,0	857,6
Среднегодовой суточный макс. осадков мм	27,3	20,1	30,7	40,8	44,0	56,0	53,7	45,3	37,0	57,1	48,0	34,0	57,1
Высота снега на 3-ю декаду месяца, см	95	115	125	84	3	0	0	0	0	10	39	72	
Число дней с твёрдыми осадками	22	20	21	15	12	—	—	—	—	13	22	23	
Число дней со смешанными осадками	0	0	1	3	2	—	—	—	—	3	1	2	
Число дней с жидкими осадками	0	0	0	3	11	—	—	—	—	10	3	1	
Число дней с туманом	4	2	3	4	3	—	—	—	—	7	7	5	
Число дней с метелями	10	8	9	4	0	—	—	—	—	3	6	9	

Методика не предполагает от пользователя знания особенностей гидрометеорологических и гидрогеологических условий, поэтому более детальная информация о климатических условиях, для расчетов и анализа результатов не использовалась. Детальное описание климатических характеристик для Хибинского массива, района городов Кировск и Апатиты, представлено, например в [24].

3.2. Расчет годового притока к карьерам.

Для разработки методики прогнозов годового притока (на основании модели с сосредоточенными параметрами) в Саамский, Коашвинский и Ньорпахский карьеры были использованы данные о величине годового притока в

них (величина водоотлива) и данные о годовых суммах осадков и среднегодовой температуре по ГЛУ “Центральный”, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные данные для модели прогноза годового притока

Год	X, мм/год	t°C,	Фактический водоприток к карьерам, м ³ /сут		
			Саамский	Коашвинский	Ньоркпахский
2005	1631	-3,4	1601	3229	295
2006	1026	-3,8	754	2456	275
2007	1570	-3,6	1197	2926	407
2008	1205	-4,2	883	2827	354
2009	1107	-4,2	920	2575	314
2010	1217	-4,3	844	3077	365
2011	1221	-2,9	941	3112	401
2012	1496	-4,3	1062	4208	455
2013	1168	-3,1	834	3718	440
2014	1249	-3,3	927	4265	508
2015	1396	-3,5	961	5103	451
2016	1561	-2,5	987	5490	532
2017	1879	-4,2	833	4619	575

Результаты расчетов (идентификации параметров моделей) для модели с постоянными коэффициентами представлены в таблице 3.3 и рисунках 3.2–3.4

Таблица 3.3. Характеристики модели формирования стока для прогноза годового

$$\text{притока к карьерам при } a = \frac{\Delta t}{\tau} = \text{const} \text{ и } b = \frac{l}{k} = \text{const}$$

Характеристика	Саамский	Коашвинский	Ньоркпахский
a	1,04339	-0,27637	-0,01837
b	1,41986	0,42162	5,92043
S	226,5	629,1	60,4
δ	217,8	987,6	92,1
δ _Δ	313,3	627,8	59,4
S/δ	1,04	0,64	0,65
S/δ _Δ	0,72	1,00	1,02
0,674δ	50,0%	66,7%	75,0%

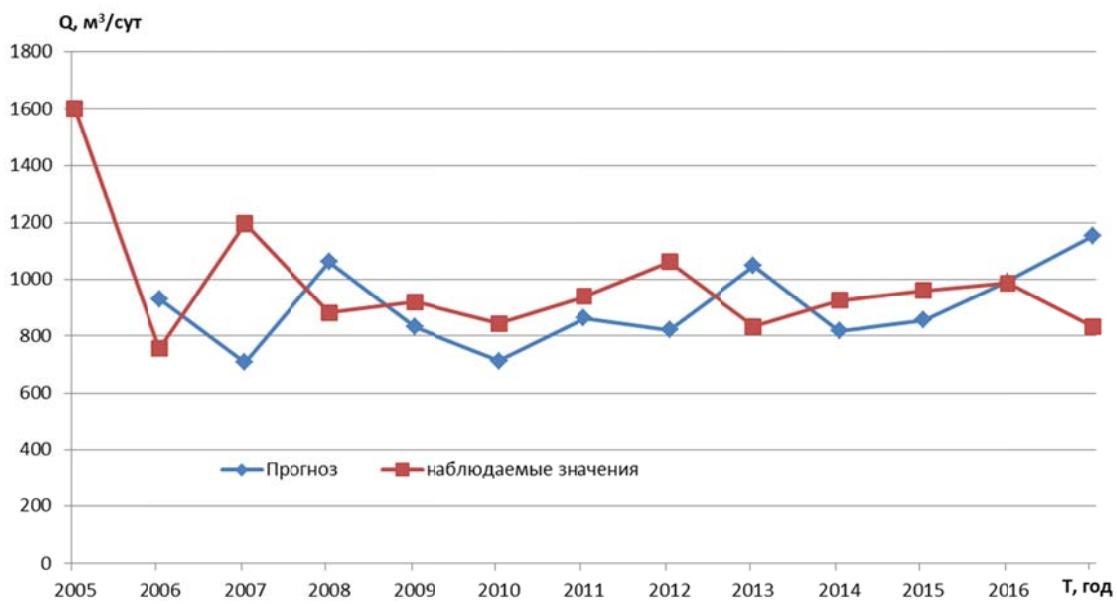


Рисунок 3.2 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к
Саамскому карьеру при постоянных коэффициентах

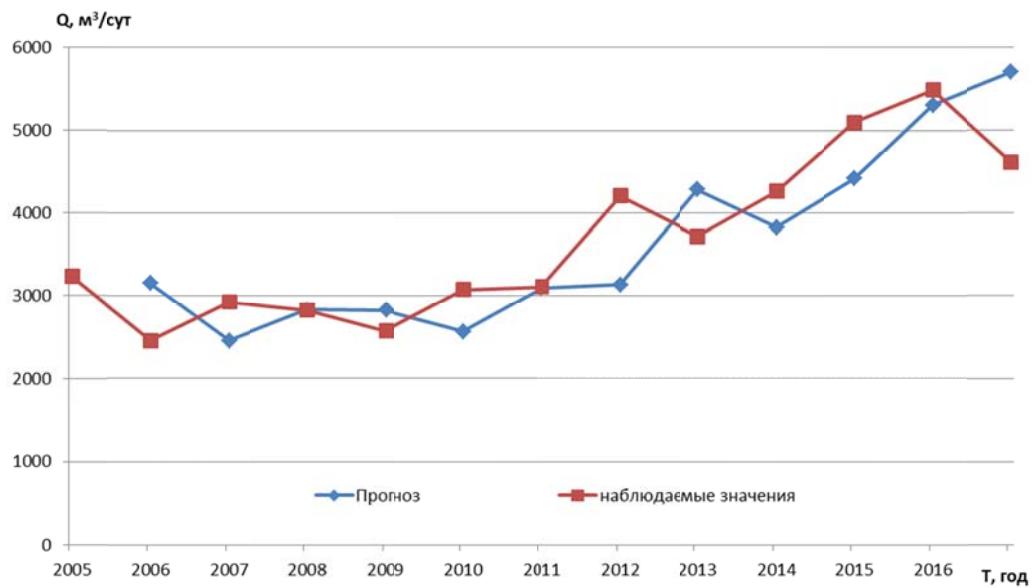


Рисунок 3.3 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к
Коашвинскому карьеру при постоянных коэффициентах

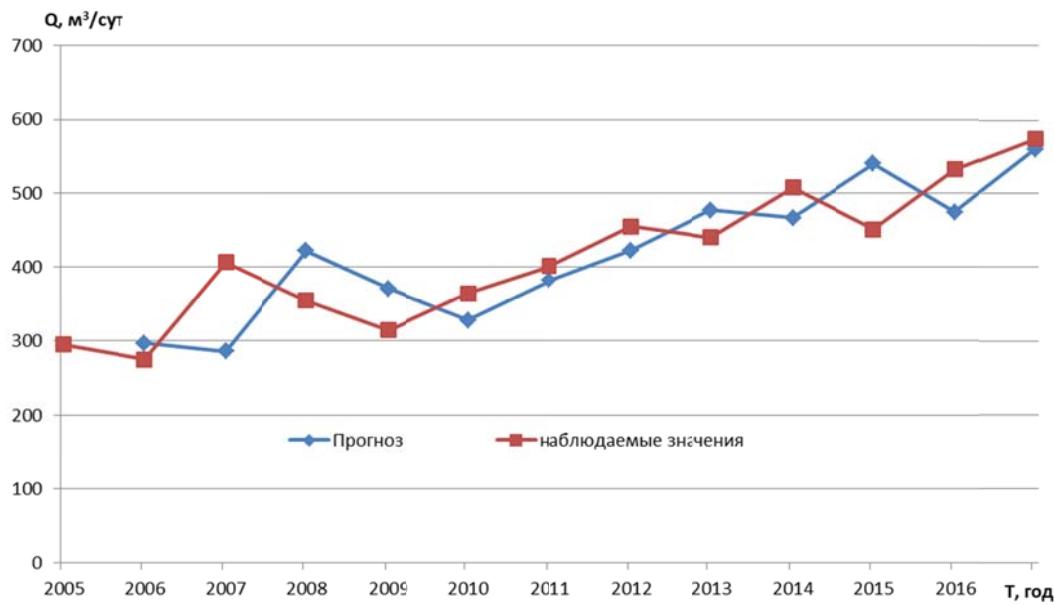


Рисунок 3.4 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к Ньоркпахскому карьеру при постоянных коэффициентах

Результаты расчетов (идентификации параметров моделей) для модели с переменными коэффициентами представлены в таблице 3.4 и рисунках 3.5–3.7

Таблица 3.4 – Характеристики модели формирования стока для прогноза годового

притока к карьерам при $a = \frac{\Delta t}{\tau} \neq const$ и $b = \frac{l}{k} \neq const$

Характеристика	Саамский	Коашвинский	Ньоркпахский
S	87,2	322,0	41,6
δ	217,8	987,6	92,1
δ_{Δ}	313,9	627,8	59,4
S/δ	0,40	0,33	0,45
S/δ_{Δ}	0,28	0,51	0,70
$0,674\delta$	91,7%	100,0%	91,7%

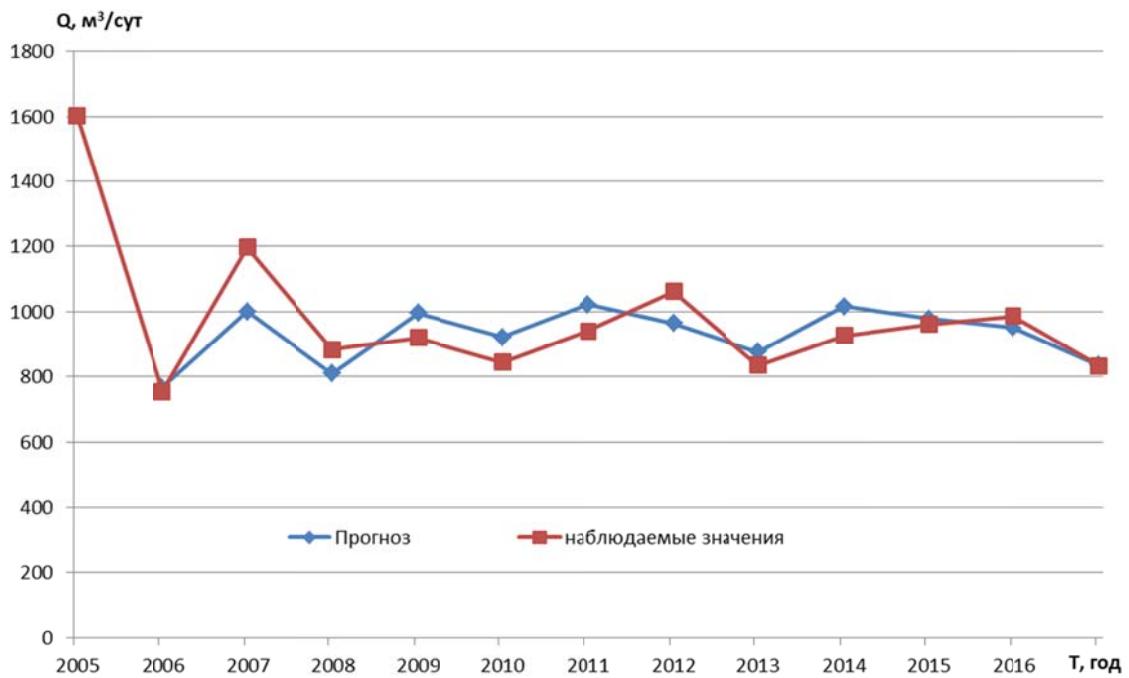


Рисунок 3.5 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к

Саамскому карьеру при $a = \frac{\Delta t}{\tau} \neq \text{const}$ и $b = \frac{l}{k} \neq \text{const}$

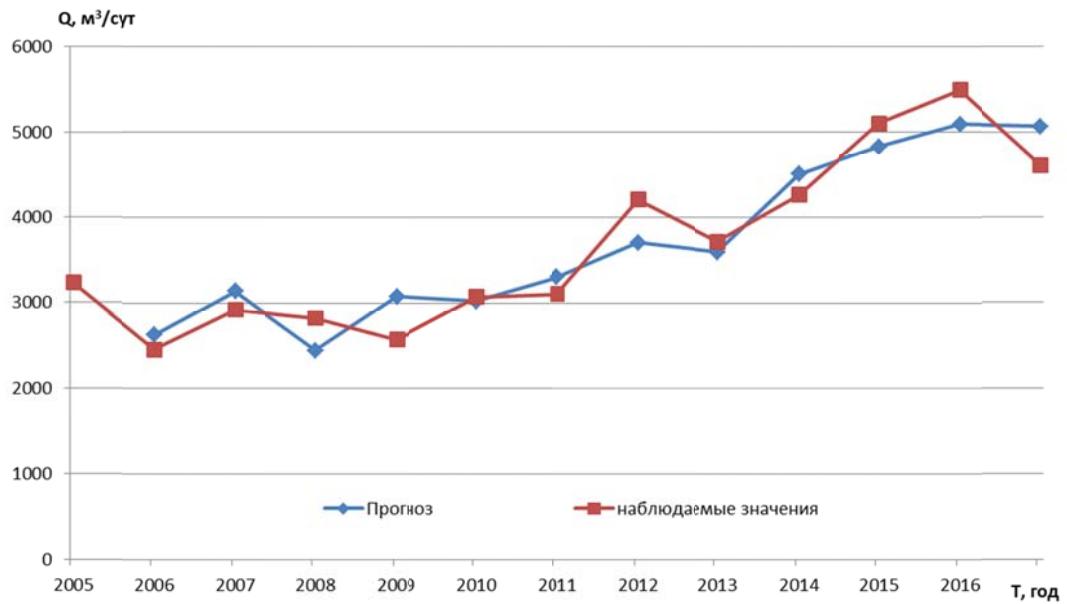


Рисунок 3.6 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к

Коашвинскому карьеру при $a = \frac{\Delta t}{\tau} \neq \text{const}$ и $b = \frac{l}{k} \neq \text{const}$

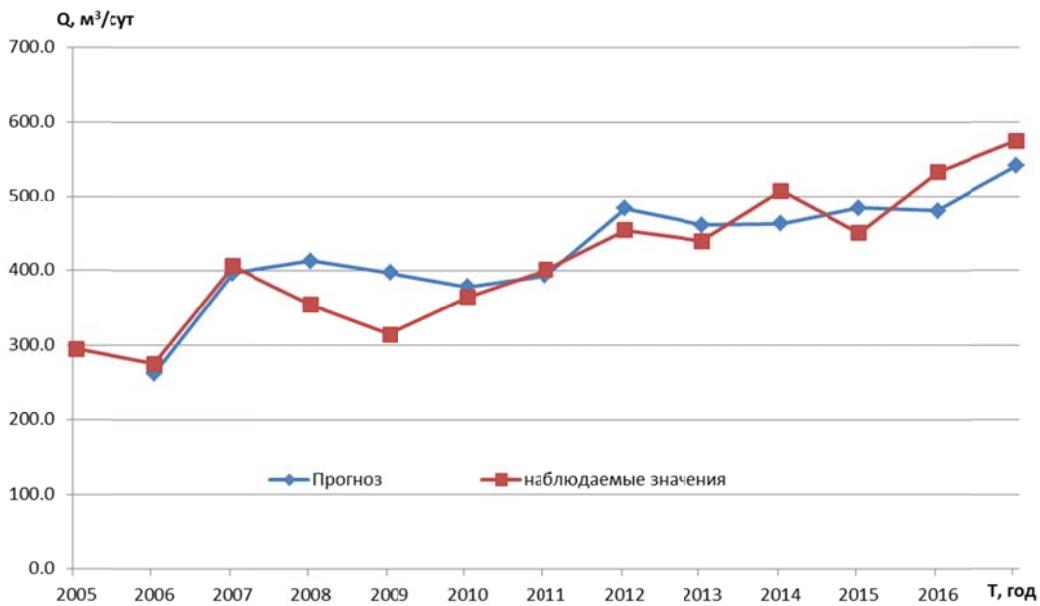


Рисунок 3.7 – Прогнозные и фактические значения среднегодового водопритока к Ньоркпахскому карьеру при $a = \frac{\Delta t}{\tau} \neq const$ и $b = \frac{l}{k} \neq const$

Из представленных рисунков и таблиц видно, что для прогнозов с помощью модели формирования стока для всех выбранных трех карьеров необходимо использование переменных коэффициентов модели. Прогнозы с постоянными коэффициентами для Саамского карьера были «неудовлетворительными»; для Коашвинского и Ньоркпахского «удовлетворительными» ($S/\delta=0,64–0,65$). Вероятно, это связано с изменением мощности безнапорного водоносного горизонта (см. раздел 2.3). Косвенно это подтверждается тем, что достичь “хороших” результатов ($S/\delta \approx 0,4$) удалось только при введении переменных коэффициентов, линейно зависящих от осадков и температуры воздуха. Но причины относительно низкой оправдываемости прогнозов могут быть и другие, например: отсутствие данных об объемах поверхностного стока, перехватываемых нагорными канавами, неточность наблюдений и т.п. Но здесь следует отметить, что смысл апробации это опробование методики для реальных условий и реальных исходных данных, которые есть в наличии у горнодобывающих предприятий. Поэтому в данном случае (на данном этапе исследования) важен не столько анализ причин, для которого нужны соответствующие дополнительные данные наблюдений и исследований, сколько

то, что предложенная методика позволила выдать достаточно надежные прогнозы (в варианте с переменными коэффициентами), для реальных условий действующих и отработанного карьеров с различным соотношением подземного и поверхностного стока в общем водопритоке.

3.3. Расчет среднемесячного притока к карьерам

Для разработки методики прогнозов среднемесячного притока в Саамский, Коашвинский и Ньорпахкский карьеры были использованы данные о величине среднемесячного притока в них (водоотлива) и данные о месячных суммах осадков и средней температуре с 2005 по 2018 гг. по ГЛУ «Центральный», представленные в приложении В. Поскольку данных в оперативном доступе о процессах весеннего снеготаяния нет, то влияние снегонакопления 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).

Результаты расчетов (идентификации параметров моделей) для модели с постоянными и переменными коэффициентами представлены в таблице 3.5 и на рисунках 3.8–3.10. Из таблицы 3.5 видно, что использование методики, основанной на модели (1.3), позволяет выдавать «хорошие» и «удовлетворительные» прогнозы водопритока к карьерам, разрабатывающим месторождения Хибинского массива, при использовании постоянных коэффициентов. Введение в модель переменных коэффициентов, зависящих от известных метеорологических параметров и техногенных воздействий (объема откачки дренажных вод), существенно не улучшили оправдываемость прогнозов. Этот результат значительно отличается от применения модели (1.3) для годовых прогнозов.

Таблица 3.5 – Характеристики модели формирования стока для прогноза среднемесячного притока к карьерам

Характеристика	Саамский	Коашвинский	Ньоркпахский
$a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и $b = \frac{l}{k} = const$			
S	460,3	555,4	112,8
δ	703,4	1672,1	202,2
δ_Δ	636,0	879,2	159,1
S/δ	0,65	0,33	0,56
S/δ_Δ	0,72	0,63	0,71
$a = \frac{\Delta t}{\tau} \neq const$ и $b = \frac{l}{k} \neq const$			
S	355,6	526,2	100,7
δ	704,7	1672,0	201,6
δ_Δ	636,0	879,3	159,1
S/δ	0,50	0,31	0,50
S/δ_Δ	0,56	0,60	0,63

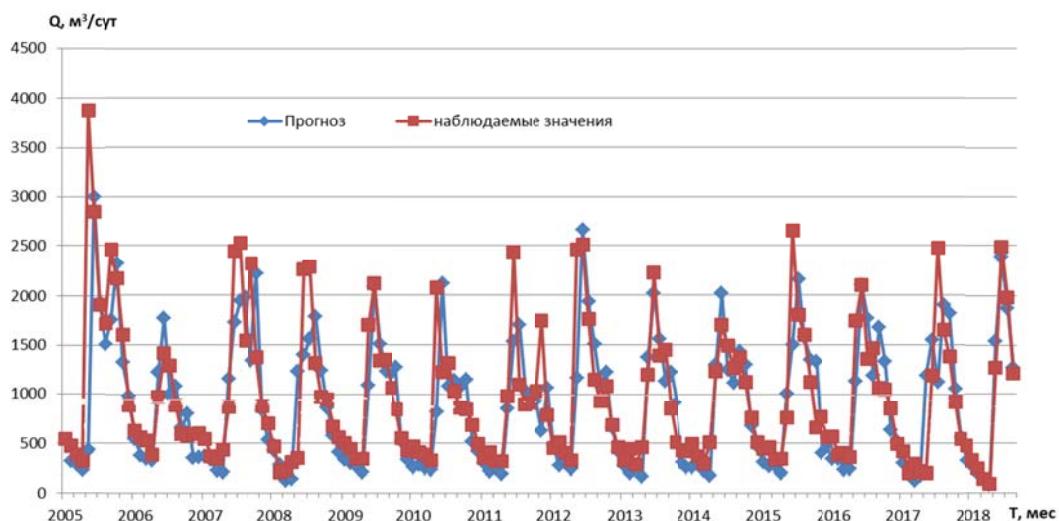


Рисунок 3.8 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока к Саамскому карьеру, при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = const$ и $b = \frac{l}{k} = const$

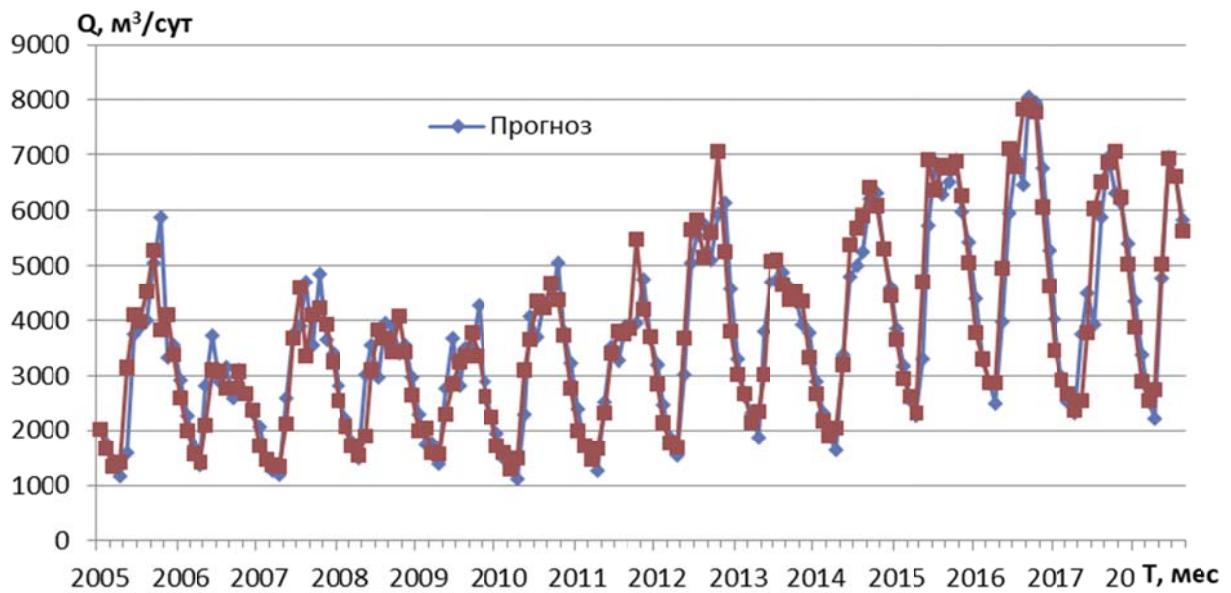


Рисунок 3.9 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного водопритока

к Коашвинскому карьеру, при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = \text{const}$ и $b = \frac{l}{k} = \text{const}$

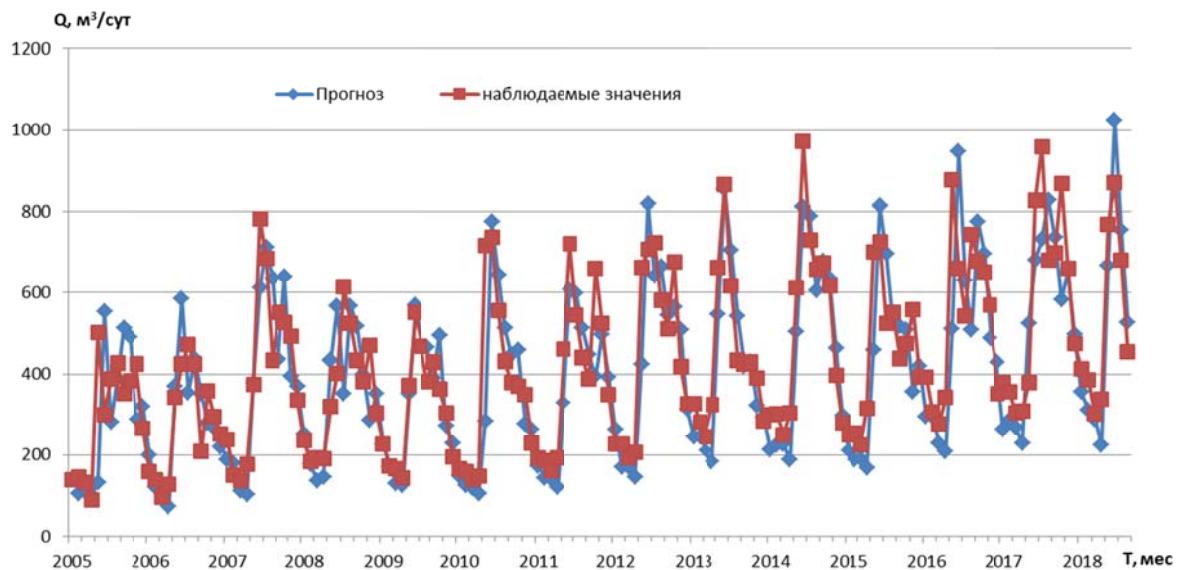


Рисунок 3.10 – Прогнозные и фактические значения среднемесячного

водопритока к Ньюркпахскому карьеру, при $a = \frac{\Delta t}{\tau} = \text{const}$ и $b = \frac{l}{k} = \text{const}$

Из сводной таблицы 3.6, где представлены сведения об оправдываемости годовых и среднемесячных прогнозов водопритока, видно, что введение переменных коэффициентов модели (прежде всего зависящих от объема водопритока к карьерам) для годовых прогнозов, значительно (в 1.5–2 раза) улучшило оправдываемость прогнозов. Наиболее вероятно, что природные и

техногенные изменения таких характеристик водного бассейна, как запасы воды, степень дренирования водоносных горизонтов карьерами и их дренажными комплексами изменяются год от года, и введение переменных коэффициентов модели позволяет их учесть.

Таблица 3.6 – Сводная таблица оправдываемости прогнозов по критерию S/δ для разработанных вариантов модели формирования стока с сосредоточенными параметрами

	Саамский	Коашвинский	Ньоркпахский
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

В среднемесячном же разрешении, эти тенденции значительно меньше природной изменчивости стока. Следует также учесть, что отсутствует информация об одном из определяющих стокоформирующих факторов – процессах снеготаяния. Соответственно, отсутствует и информация о количестве и времени поступления жидких осадков на водосбор. Это не позволяет улучшить точность модели и достоверно оценить вклад природных и техногенных воздействий на среднемесячный водоприток. Тем не менее, основной вывод следующий. Применение методики, основанной на модели формирования стока с сосредоточенными параметрами (1.3), позволило получить надежные долгосрочные прогнозы среднемесячного и среднегодового водопритока к карьерам, разрабатывающим месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.

В перспективе, скорее всего, используя дополнительную доступную информацию, данные дистанционного зондирования Земли [21, 34, 46] (например, электронные ресурсы [41, 42]) и небольшое количество тарировочных наземных наблюдений, в частности, за величиной снежного покрова и водозапасов в нем, точность прогнозов можно повысить.

4. Прогноз среднегодового и минимального стока для рек, подверженных влиянию ГОКа им. В. Гриба

4. 1 Влияние горных работ на речной сток

Трубка им. В. Гриба находится на водоразделе, между бассейном р. Мезень (левого ее притока р. Сояна) и области прямого стока в Белое море на участке между Двинской и Мезенской губой (р. Мегра). До разработки карьера сток с северо-восточной части площади водосбора карьера из озера Волчье, через Мегрские озера был направлен в сторону Зимнего берега. При этом не исключено, что в некоторые годы сток из Волчих озер мог быть распределен по двум направлениям, как в сторону Мегрских озер, так и в оз. Черное (см. рисунок 4.1). Северо-западная и южная часть карьерного поля, на которой протекают реки: Кукомка, Черная, Падун, Ерна, относились к водосбору р. Сояна.

При строительстве дренажной системы карьера часть стока была перераспределена между бассейнами. Сток из верховьев р. Кукомки перенаправлен в оз. Волчье. Для этого на р. Кукомке и оз. Черном созданы две плотины. Первая, расположенная выше карьера, повысила уровень в реке на 3,5–5 м для создания превышения уровней воды, обеспечивающего течение по каналу в Волчий озеро. Вторая, расположенная ниже карьера, препятствует обратному течению в него из оз. Черного.

Основное воздействие на режим поверхностных вод оказывает дренажная система карьера (в том числе контур ВПС). С одной стороны она уменьшает величину подземного питания участков рек и озер, расположенных в пределах радиуса влияния карьера. С другой – увеличивает сток рек Волчья и Черная за счет сброса в них перехваченных подземных (дренажных) вод. Сброс дренажных вод приводит к изменению режима взвешенных и влекомых наносов, осадконакоплению в озерах, изменению гидрохимического режима поверхностных вод, уменьшению толщины ледяного покрова непосредственно в месте сброса дренажных вод и т.п.

Для наблюдения за режимом водоемов и водотоков на месторождении алмазов им. В. Гриба, в том числе за происходящими техногенными изменениями, с 2011 года проводятся наблюдения на 11-и гидропостах, из которых 4-е уровнемерных и 7 стоковых. Схема их расположения представлена на рисунке 4.1.

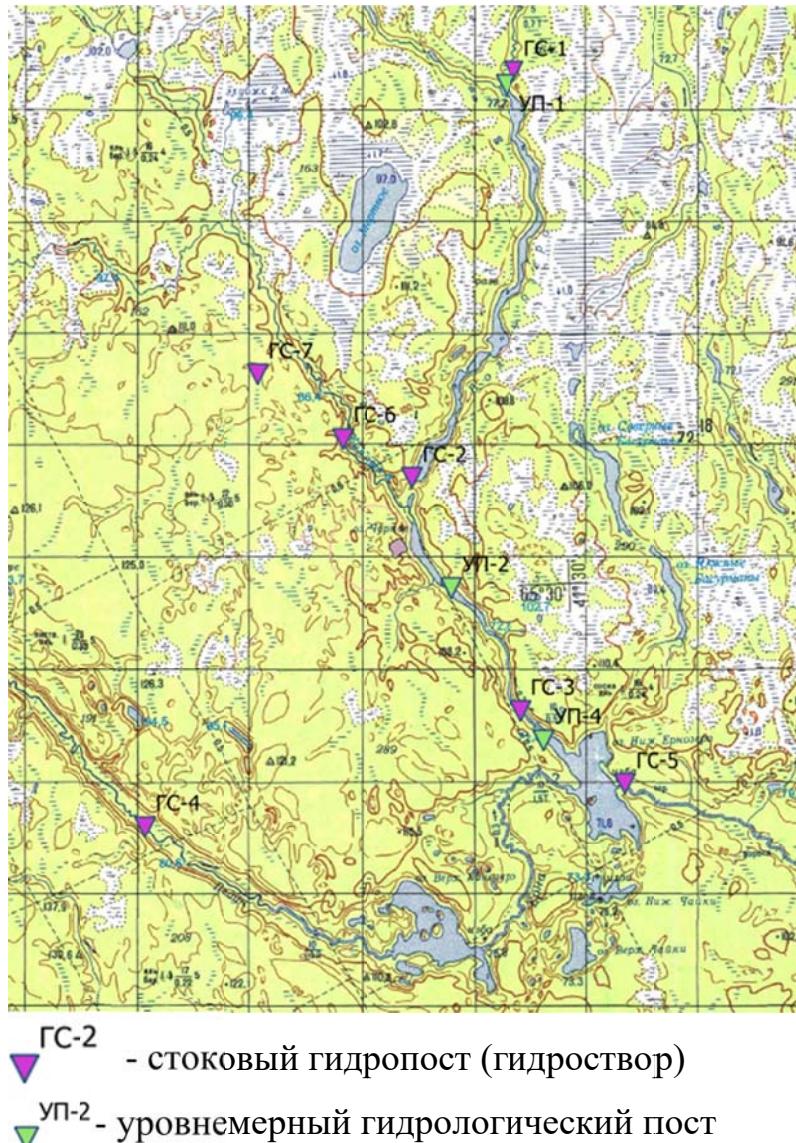


Рисунок 4.1 – Схема расположения гидростволов и уровенных постов в районе месторождения им. В.П. Гриба

4.1.1 Гидрологический режим на карьерном поле в бассейне р. Мегры

Наблюдения за стоком р. Кукомки и р. Волчьей (Волчих, проточных озер) осуществляется с 2011 года на 3-х стоковых постах №№ ГС-1, ГС-2, ГС-6 и одном

уровнемерном посту УП-1. В год на каждом стоковом гидропосту производится до 50 измерений расходов воды. Уровень в оз. Черном на УП-1 измеряется около 100 раз в год.

Результаты наблюдений до сентября 2012 года, до начала активного строительства карьера, могут считаться фоновыми . С сентября 2012 года постепенно начал вводится в эксплуатацию контур ВПС. Сравним, представленные на рисунке 4.2 гидрографы р. Кукомки на ГС-2 за 2012 и 2021 годы.

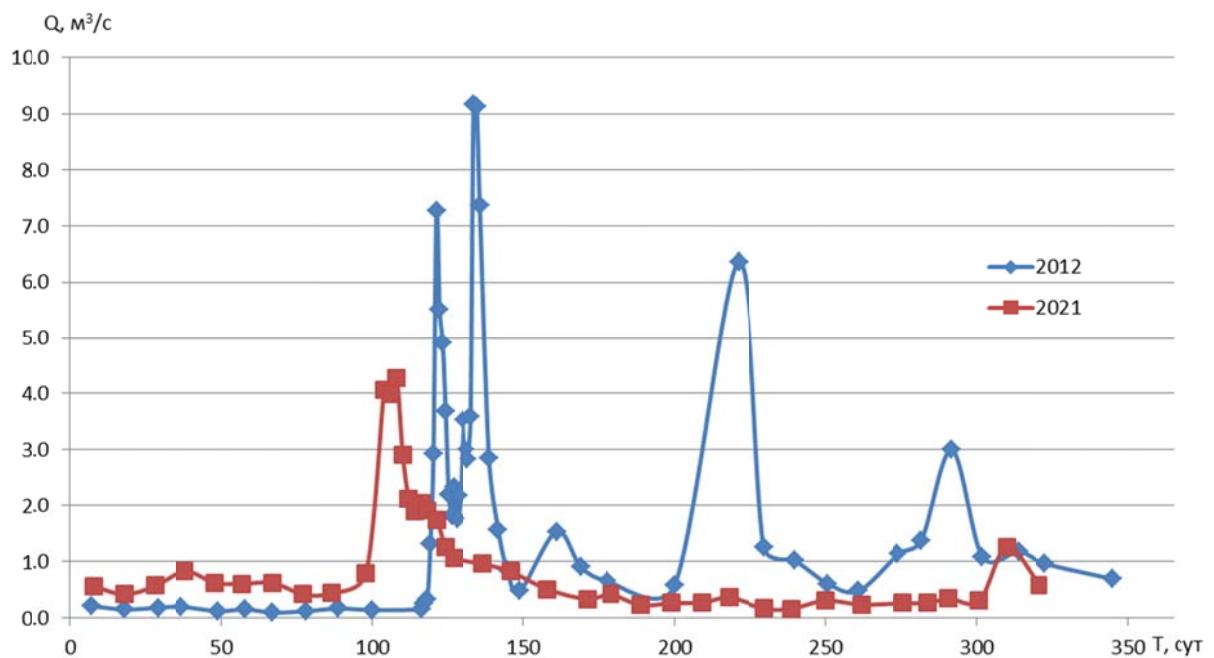


Рисунок 4.2 – Гидрограф р. Кукомки на ГС-2 в 2012 и 2021 гг

Из этого рисунка видно, что расходы воды в период зимней межени в 2012 году составляли 0,1–0,2 м³/с. В 2021 году они были значительно выше и составляли около 0,5 м³/с. Причем, в этот год они были выше значений, фиксируемых в летнюю межень, что не характерно для режима рек Архангельской области. Подобная картина наблюдается и ниже по течению, на ГС-1 (рисунок 4.3).

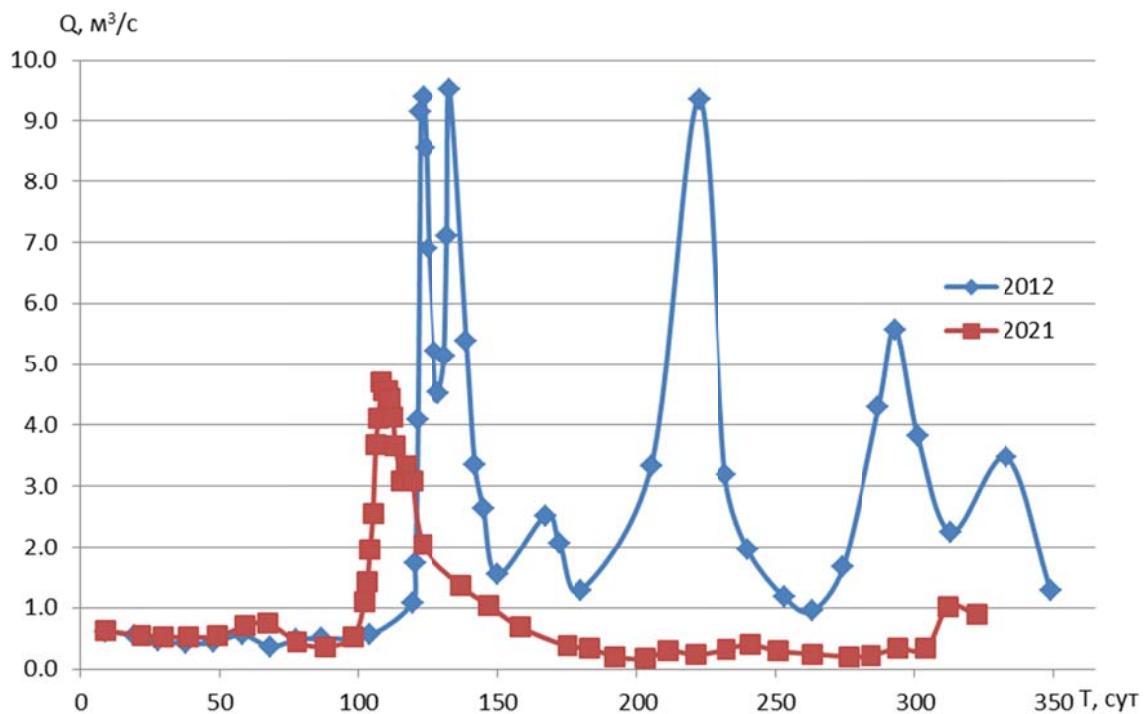


Рисунок 4.3 – Гидрограф р. Волчьей на ГС-1 в 2012 и 2021 гг

Здесь также можно отметить превышение зимних расходов над летними. Превышение зимних расходов воды наблюдается и на верхнем гидропосту ГС-6 (рисунок 4.4), но в целом, оно было менее выражено, чем для ГС-2.

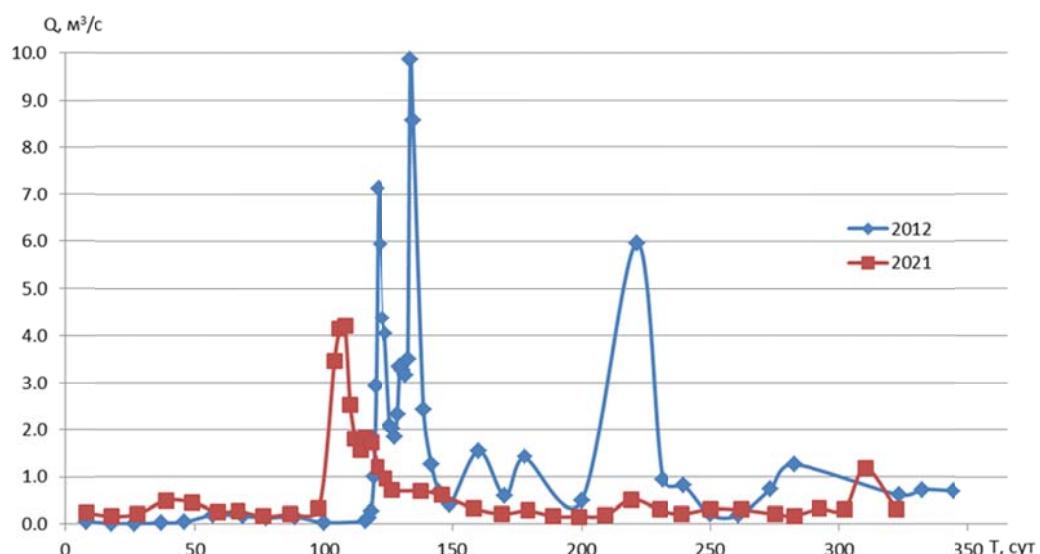


Рисунок 4.4 – Гидрограф р. Кукомки на ГС-6 в 2012 и 2021 гг

Объяснить такое соотношение стока зимней и летней межени можно, рассматривая графики, представленные на рисунках 4.5 и 4.6. Из рисунка 4.5, на котором представлен хронологический график расходов воды, измеренных в январе и феврале на ГС-2 с 2012 по 2024 гг. и объем откачки с северной части контура ВПС (скважины №№ 27–47), видно, что увеличение расходов зимней межени реки связано с поступлением в нее у ГС-2 дренажных вод. С 2013 года дренажные воды стали практически самым главным фактором, определяющим гидрологический режим в период межени. Но не только это вызвало превышение зимних расходов над летними. Сброс дренажных вод в реку практически постоянен в течение года (начиная с 2013–2014 гг.). Поэтому он мог вызвать общее повышение меженного стока, но не мог привести к превышению зимних расходов над летними.

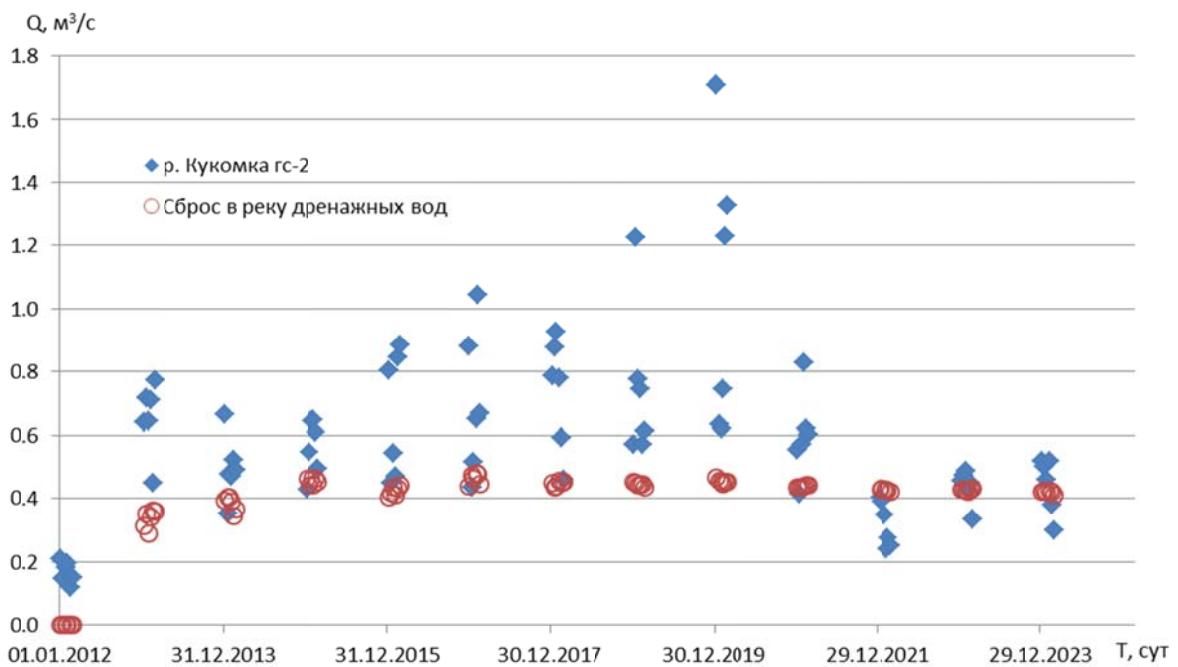


Рисунок 4.5 – Расходы воды, измеренные в январе и феврале, на ГС-2 с 2012 по 2021 гг

Рассмотрим рисунок 4.6, на котором представлены разности значений между измеренными расходами воды на ГС-1 и ГС-2 за январь и февраль месяц с 2012 по 2021 годы. Т.е. за период, когда единственным природным источником

питания реки являются подземные воды, и прирост стока между гидропостами практически точно должен соответствовать величине подземного питания. Зимой 2012 и 2013 года прирост стока на этом участке составлял $0,3\text{--}0,4 \text{ м}^3/\text{с}$. Но, начиная с 2014–2015 гг., наблюдалась его потеря. Причем потеря стока могла привести к осушению (перемерзанию) реки при отсутствии сброса дренажных вод.

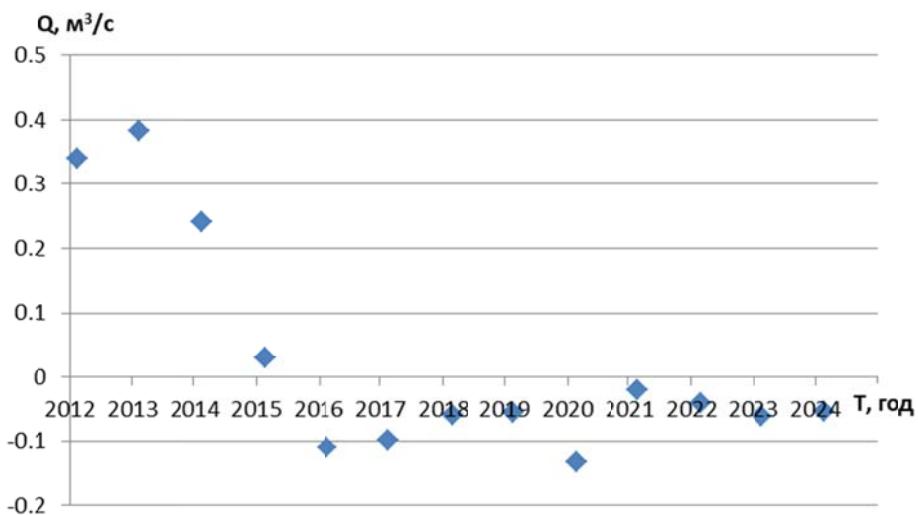


Рисунок 4.6 – Хронологический график разности стока между ГС-1 и ГС-2 в январе и феврале 2012–2021 гг

Величину потери стока в периоды зимней межени 2015–2021 гг. можно оценить в пределах $0,03\text{--}0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ($2600\text{--}4300 \text{ м}^3/\text{сут.}$). Таким образом, до строительства карьера Волчий озера (р. Волчья) являлись местом разгрузки подземных вод, за исключением периода весеннего половодья, и, возможно, экстремальных паводков. В настоящее время озеро подвешено относительно всех водоносных горизонтов и во все сезоны года стало их источником питания. Соотношение подземного питания (потерь) рек в периоды летней и зимней межени изменилось. В частности, это и вызывает небольшое превышение зимнего стока над летним. Также можно предположить, что в периоды половодья и осенних паводков потери стока выше, чем зимой, в частности, за счет более высокого уровня в Волчьих озерах.

Точно оценить величину потерь стока за теплый период года по данным гидрометрических наблюдений несколько затруднительно, несмотря на высокое качество измеренных расходов воды.

Вопрос качества и количества гидрометрических работ следует выделить отдельно. Наблюдения за расходами воды выполнялись раз в неделю. Качество их выполнения характеризует кривая $Q=f(H)$, представленная на рисунке 4.7. На графике можно видеть относительно надежные кривые $Q=f(H)$, позволяющие ретроспективно, по измеренным уровням восстанавливать расходы воды, в частности, по измеренным среднесуточным значениям уровней воды восстанавливать ежедневный сток.

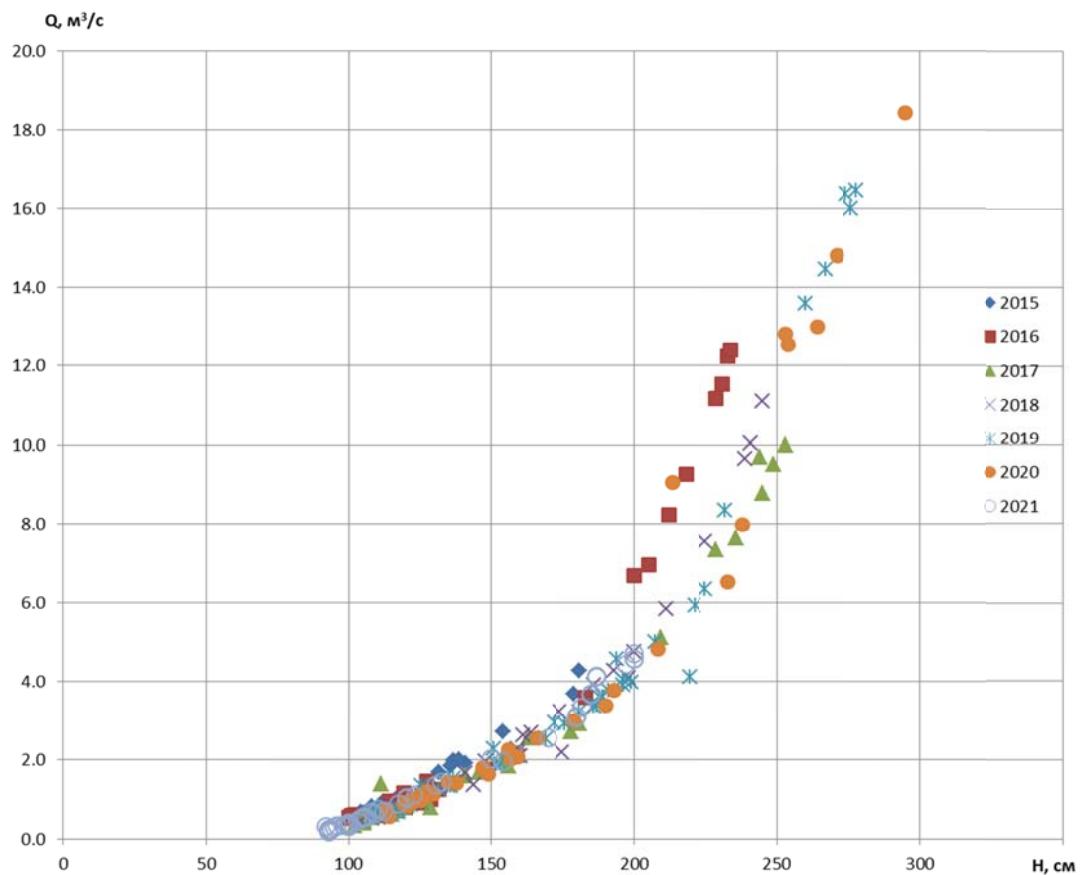


Рисунок 4.7 – Кривая $Q=f(H)$ для р. Волчья ГС-1

Но при наличии достаточного количества наблюдений за расходами воды, отсутствуют намного менее трудоемкие (при использовании самописцев) ежедневные наблюдения за уровнями воды. Это снижает точность оценки

среднемесячного и годового стока, а главное не позволяет с достаточной точностью рассчитать потери стока в периоды половодья и паводков. Например, на рисунке 4.8 представлены гидрографы для рек Кукомка и Волчья с 2012 по 2024 гг. Из этого рисунка видно, что превышения измеренных расходов воды на верхнем ГС-2 над значениями, зафиксированными на нижнем гидропосту ГС-1, наблюдались не только в периоды межени, но и в периоды весеннего половодья и осенних паводков. Но без измеренных ежедневных значений уровней воды и возможности восстановить сток делать вывод, что имела место потеря стока некорректно. Видимость потери стока могла быть вызвана несинхронными измерениями расходов воды, быстрым прохождением пика паводка, регулирующим влиянием Волчьих озер и пр.

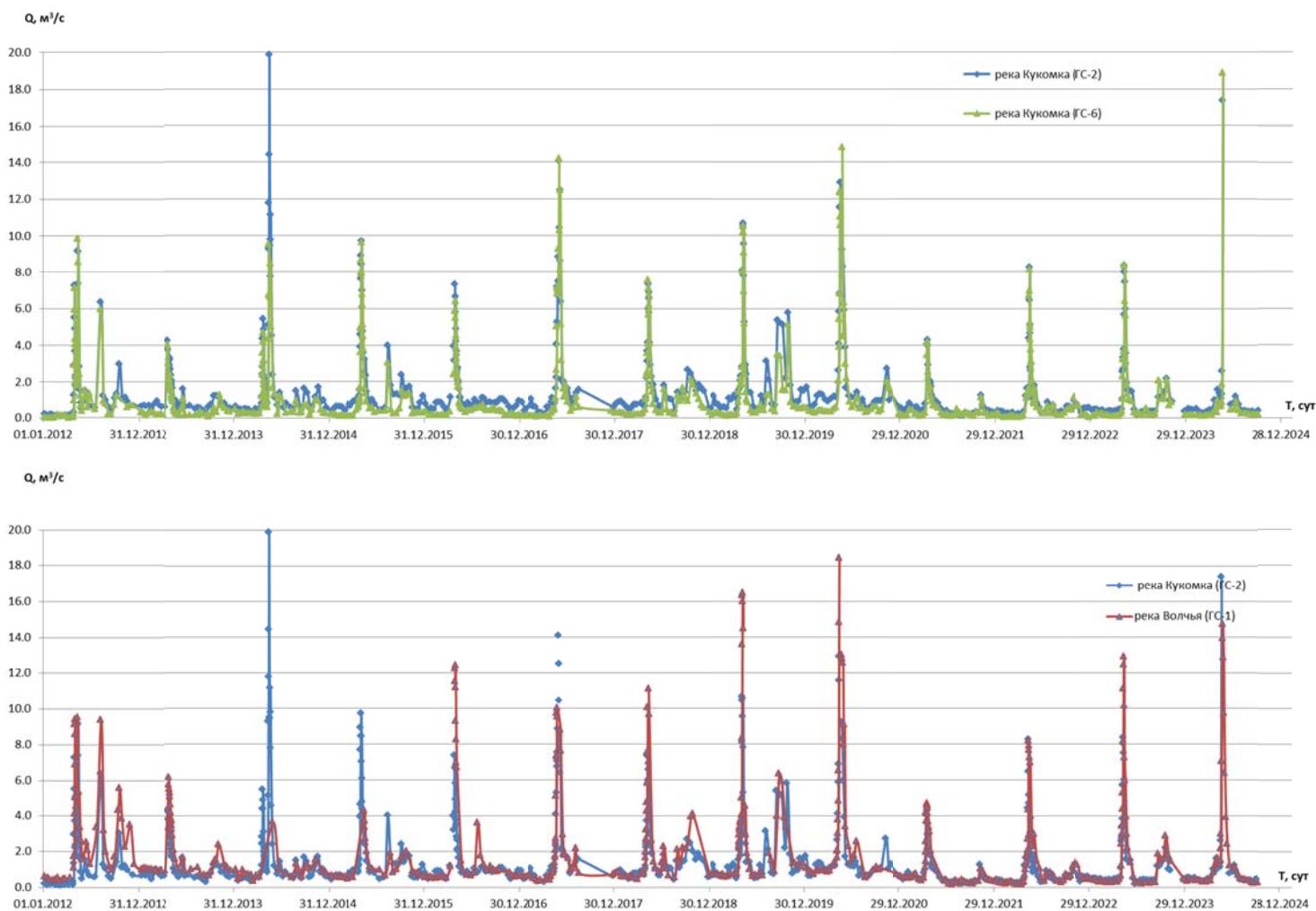


Рисунок 4.8 – Гидрографы рр. Кукомки и Волчьей на ГС-6, ГС-2, ГС-1 в 2012 и 2024 гг

4.1.2 Гидрологический режим на карьерном поле в бассейне р. Сояна

Самой крупной рекой, замыкающей гидросеть южной и юго-восточной части площади водосбора карьера, является р. Ерна. Сток ее измеряется в истоке из нижнего Ернозера на ГС-5. В р. Ерну впадает два крупных притока: р. Падун и р. Черная. Река Падун протекает по юго-западной границе предполагаемого влияния воронки депрессии, образованной контуром ВПС и карьером, и впадает в Верхнее Ернозеро. Река Черная берет свое начало из проточного, относительно узкого озера Черного, в которое ранее, с севера впадала р. Кукомка.

Начиная с 2011 года сток р. Кукомки перенаправлен в Волчье озера. Северная часть оз. Черного перегорожена дамбой. Площадь водосбора р. Черной на ГС-2 снизилась со 105 км^2 до первых км^2 . Сток реки практически полностью сформирован сбросом дренажных вод. В период с 07.07.2012 г. по 24.02.2015 г. в сохраняемую часть озера производился сброс очищенных карьерных вод. С августа 2013 года в неё сбрасываются дренажные воды контура ВПС. Техногенный характер стока отчетливо виден на гидрографе, представленном на рисунке 4.9. На ГС-3 полностью отсутствует сезонная изменчивость, величина стока близка (в пределах гидрометрической точности и разности во времени замеров расходов) к величине суммарного сброса в нее дренажных вод.

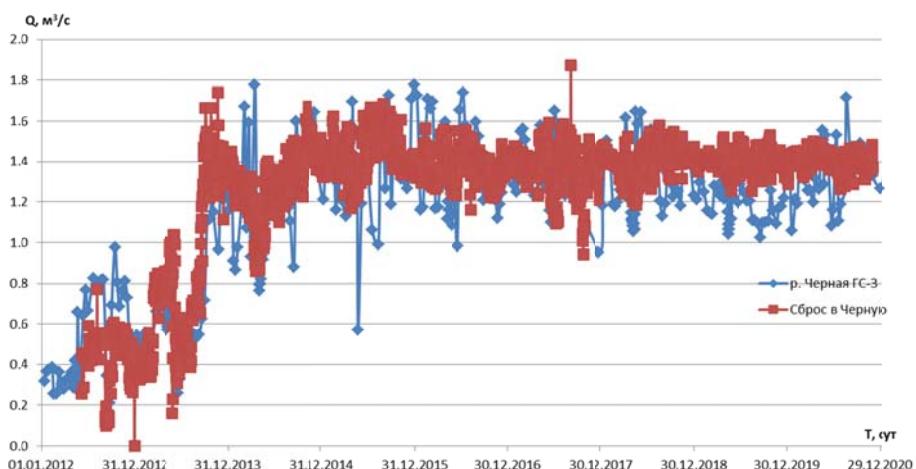


Рисунок 4.9 – Гидрограф р. Черной на ГС-3 и расход сбрасываемых в нее дренажных вод

Существенным является тот факт, что, несмотря на техногенный характер стока, среднегодовые его значения близки к природным. При площади водосбора 105 км^2 и модуле годового стока $11 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ [6] среднегодовой сток р. Черной должен был составлять $1,16 \text{ м}^3/\text{s}$. Наблюдаемые значения немногим выше этого. Этот факт обусловлен реализованными проектными решениями по сбросу дренажных вод, принятыми на основании оценок возможного ущерба речного стока на стадии проектирования [43].

На рисунке 4.10 представлены гидрографы рек Падун и Ерна на гидропостах ГС-4 и ГС-5 соответственно. На них изменений стока, подобным тем, что были отмечены на р. Волчьей (см. также рисунок 4.8), не наблюдалось.

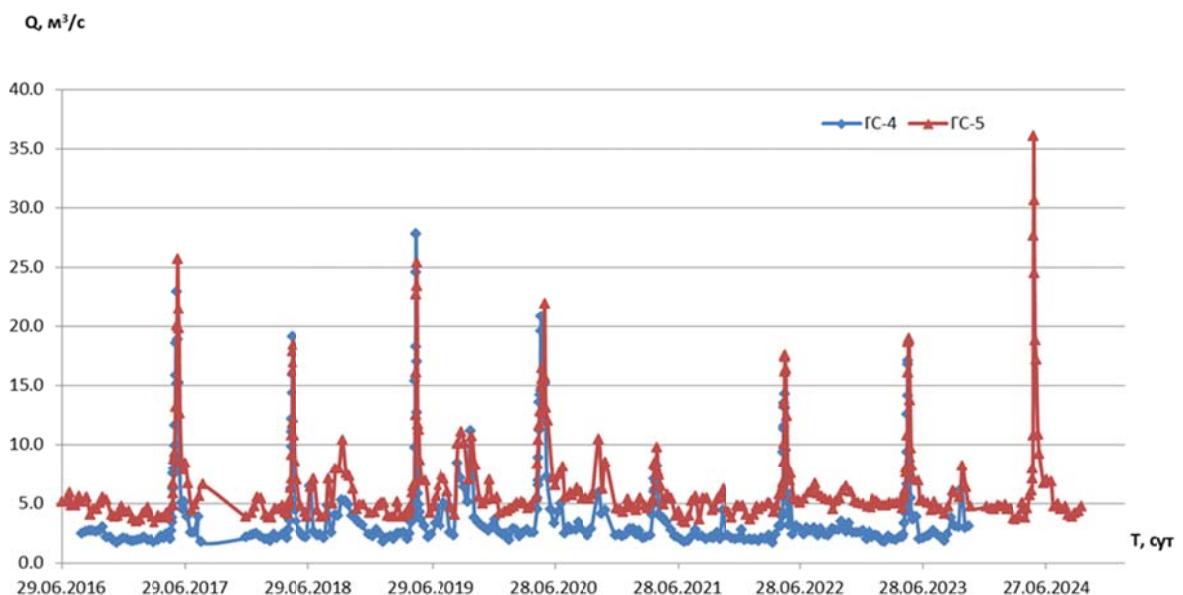


Рисунок 4.10 – Гидрограф р. Падун на ГС-4 и р. Ерна на ГС-5

Связано это с тем, что эти реки (гидропосты) наиболее удалены от карьера, находятся на границе его влияния, а р. Ерна на ГС-5 «замыкает» площадь водосбора (водного бассейна), подверженную техногенному влиянию. Поэтому работа контура ВПС не вызывает изменения стока на ГС-5, а лишь перераспределяет в пределах радиуса влияния подземную и поверхностную составляющие. В частности, перехваченный дренажной системой карьера подземный сток из водосбора р. Ерны, разгрузится в нее, но уже в виде поверхностного стока, по р. Черной. Некоторое превышение водного баланса

могло наблюдаваться лишь в первое время работы контура, при сработке статических запасов подземных вод.

4.2 Прогноз годового минимального стока для рр. Волчей и Кукомки

Апробация предлагаемого метода для прогнозов среднегодового и минимального стока зимней межени (минимального среднесуточного) стока была проведена на примере стока рек, подверженных влиянию карьера, разрабатывающего месторождение алмазов им. В Гриба.

Для рек Кукомка и Волчья, по методике, изложенной в разделе 1.4, составлены прогнозы годового и минимального стока зимней межени с заблаговременностью 1 год. Коэффициент k в модели (3.1) принимался переменным, линейно зависящим от величины откачки из карьера или дебита дренажного контура. Результаты расчетов представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.11.

Таблица 4.1 Сводная таблица оправдываемости долгосрочных прогнозов по критериям S/δ и S/δ_Δ и для рек Кукомка и Волчья

	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		
Модель с постоянными коэффициентами	0,64	0,62
Модель с переменными коэффициентами	0,42	0,40

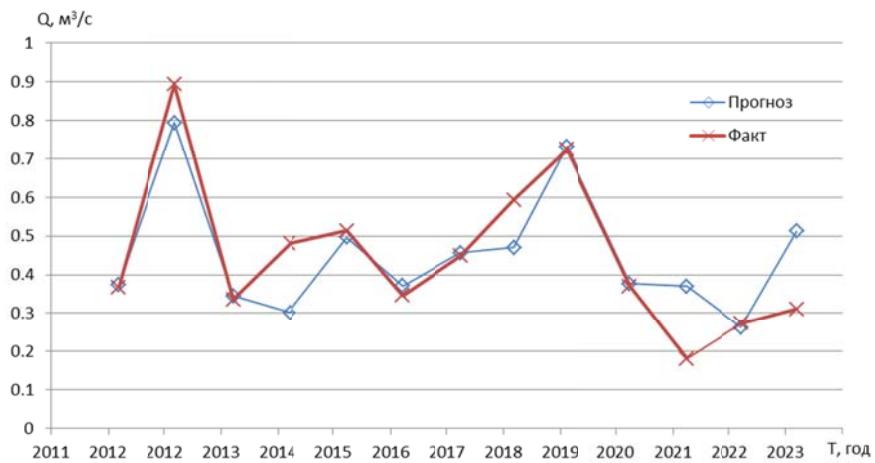


Рисунок 4.11 – Прогнозные и фактические значения минимального стока зимней межени р. Волчей на г/п-1

Из представленной таблицы и рисунка видно, что:

- использование переменных коэффициентов рассматриваемой модели позволило повысить оправдываемость прогнозов среднегодового и минимального стока;
- прогнозы минимального стока для рек Волчей и Кукомки можно отнести к категории «хороших», годового стока р. Волчей к категории «удовлетворительных», а годового стока р. Кукомка – «неудовлетворительных».

Относительно низкая точность прогнозов годового стока, скорее всего, во многом связана с низкой точностью его оценки, поскольку на рассматриваемых реках расходы измеряются довольно часто, 30–50 раз год, но отсутствуют данные наблюдений за уровнями воды и, соответственно, нет возможности восстановления суточного стока. В целом можно заключить, что модель формирования стока с сосредоточенными параметрами может быть применима для долгосрочных прогнозов среднегодового и минимального суточного стока в условиях техногенного воздействия на режим подземных вод горных работ, по крайней мере, для геологических условий 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 карьеру и подземного питания рек в радиусе его влияния на режим подземных вод;
- проведена апробация предлагаемой методики на примере Коашвинского, Ньоркпахского 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 1 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов, Ю. Б., Виноградова Т. А. Математическое моделирование в гидрологии : учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2010. 299 с.
2. Георгиевский Ю.М. Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб.: РГГМУ, 2007. 435 с.
3. Гриневский С.О. Геогидродинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: ИНФРА-М, 2012. 151 с.
4. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрогеологических моделей. // Водные ресурсы. 2010. Т.37. №5. С. 543-557.
5. Догановский А.М. Гидрология суши (общий курс). СПб.: РГГМУ, 2012. 523 с.
6. Инженерные изыскания для разработки проектной документации «Строительство ГОКа на базе месторождения алмазов им. В. Гриба» Инженерно-гидрометеорологические данные Том 14 Часть 2. Инженерно-гидрологические работы, ОАО «Архангельскгеолдобыча», Архангельск 2010г.
7. Коваленко В.В. Викторова Н.В. Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. СПб. РГГМУ, 2006. 556 с.
8. 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.
9. Коваленко В.В. Гайдукова Е.В. Хаустов В.А. и др. Частично инфинитное моделирование развивающихся гидрологических систем. СПб.: РГГМУ, 2021. 120 с

10. Коваленко В.В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процесса формирования речного стока. СПб.: РГГМУ, 2004. 197 с.
11. Котлов С. Н., Шамшев А. А. Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин // ГИАБ. 2019. № 6. С. 45–55.
12. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 143 с.
13. Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач // Материалы конференции научное обеспечение "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года", Том 1, Карельский НЦ РАН, Петрозаводск, 2015. – С. 74–80.
14. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Кепино. Справочно-информационный портал «Погода и климат». Режим доступа: URL Http://www.pogodaiklimat.ru/HiStory/22456_2.Htm (дата обращения 10.01.2024).
15. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Горнопромышленная гидрогеология. М.: Недра, 1989. 287 с.
16. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 2001. 519 с.
17. Мотовилов Ю.Г., Гельфанд А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Издательство РАН, 2018. 296 с.
18. 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.
19. Отчет о научно-исследовательской работе: «Научное сопровождение освоения месторождения алмазов им. В. Гриба», Санкт-Петербургский горный университет, С-Петербург 2009 г.

20. Отчет о результатах поисковых и оценочных работ на Верхотинской площади, проведенных в 1994-2002 гг., ЗАО «Архангельскгеолразведка». г. Новодвинск, 2002.
21. 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.
22. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 256 с.
23. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 3. Северный край. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 663 с.
24. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 1. Кольский полуостров. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 316 с.
25. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2006.
26. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 892 с.
27. СП 103.13330.2012. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. М., 2012. 68 с.
28. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2004. 73 с
29. СП 529.1325800.2023 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2023. 103 с
30. Справочное руководство гидрогеолога. Т.1. Л.: Недра, 1979. 512 с.
31. Технический отчет по инженерным изысканиям, выполненным на объекте «Рудник «Восточный» по добыче апатит-нефелиновых руд», Том IV Инженерно-гидрометеорологические изыскания, г. Мурманск 2012.
32. «ТЭО кондиций для месторождения алмазов им. В Гриба» ЗАО НОРДЭКО ЕВРАЗИЯ М., 2008

33. Фролов А.В. Соломонова И.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний стока р. Северной Двины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 54—70.
34. Чурюлин Е. В., Копейкин В. В., Розинкина И. А., Фролова Н. Л., Чурюлина А. Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368) С. 120–143.
35. Шестаков В. М., Поздняков С.П. Геогидрогеология. М.: Академкнига, 2003. 177 с.
36. Bergstrom S. Experience from applications of the HBV Hydrological model from the perspective of prediction in ungauged basin // IAHS, January 2006, p.97-107.
37. Bergstrom S. and Sandberg G. Simulation of Groundwater Response by Conceptual Model//Nordic Hydrology 1983, p.71-84.
38. Bergstrom S. The development of a snow routine for the HBV model //Nordic Hydrology 1975, №6 p.73-92.
39. Bergström S. The HBV model - its structure and applications. 1992 SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping.
40. Christian D. Langevin, Joseph D. Hughes, Edward R. Banta, Richard G. Niswonger. 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.
41. CMAP Precipitation / Physical Sciences Laboratory. URL: <Https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cmap.Html> (дата обращения: 15.03.2023).
42. GlobSnow snow products / Finnish Meteorological Institute. URL: <Https://www.globsnow.info/index.php?page=Products> (дата обращения: 15.03.2023).

43. Norvatov Y. A., Petrova I. B., Kotlov S. N. Hydroecological conditions for the opencast mining of the grib diamond deposit // Water Resources. – 2012. – Vol. 39, No. 7. – P. 798-801.
44. Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales : Cambridge University Press, 2013. – 465 p.
45. Shevnina E., Silaev A. The probabilistic hydrological marcshydro (the Marhov chain system) model: its structure and core version 0.2 // Geoscientific Model Development. 2019. T. 12. № 7. C. 2767—2780.
46. Yiwen Mei, Juliane Mai, Hong Xuan Do, Andrew Gronewold, Howard Reeves, Sandra Eberts, Richard Niswonger, R. Steven Regan, and Randall J. Hunt. Can Hydrological models benefit from using global soil moisture, evapotranspiration, and runoff products as calibration targets. // Water Resources Research. – 2023. – №59. doi: 10.1029/2022WR032064/.

Приложение А

Карты-схемы кровли гидрологических подразделений

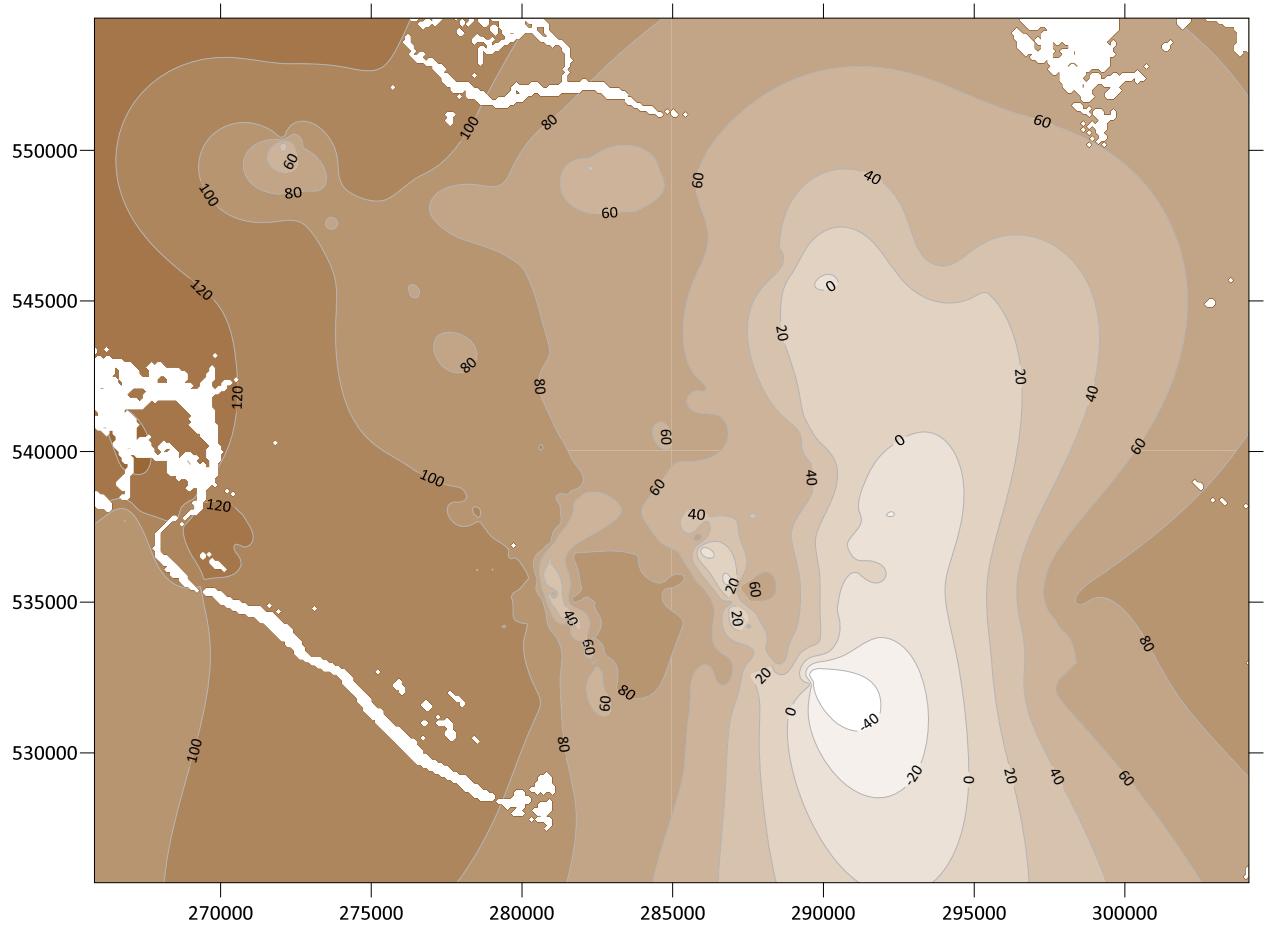


Рисунок А.1 – Карта-схема кровли олмуго-окуневских отложений

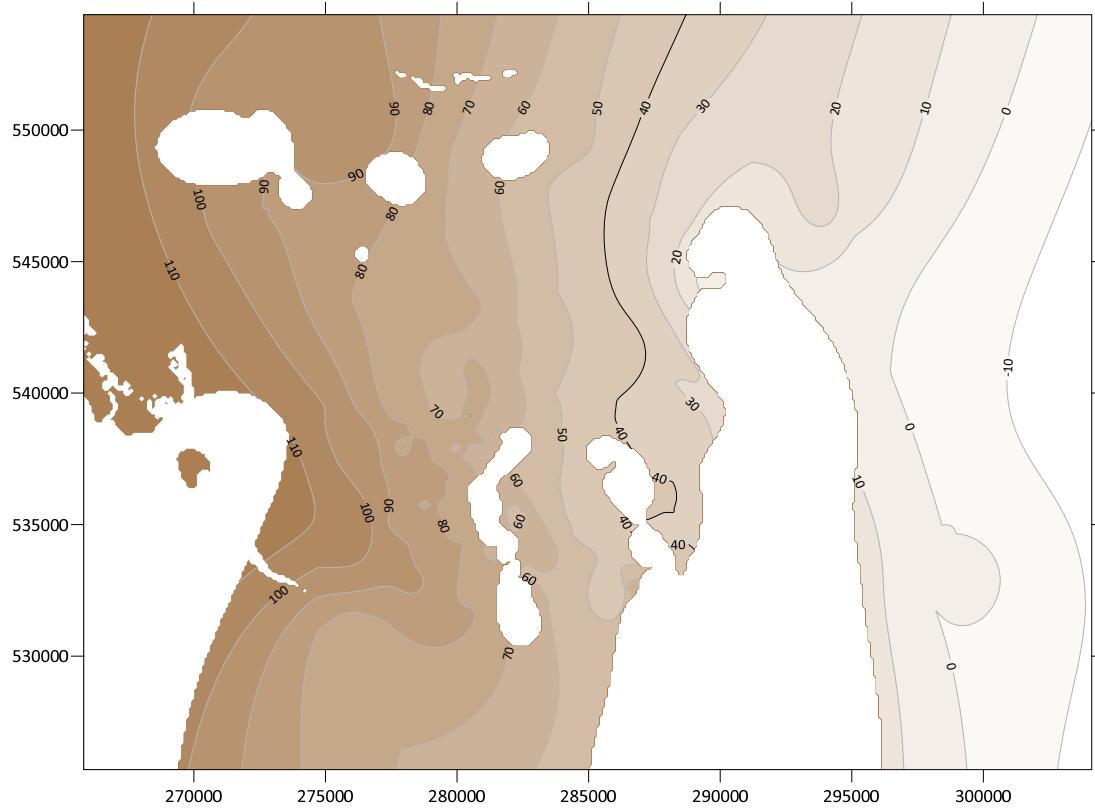


Рисунок А.2 –Карта-схема кровли воереченских отложений

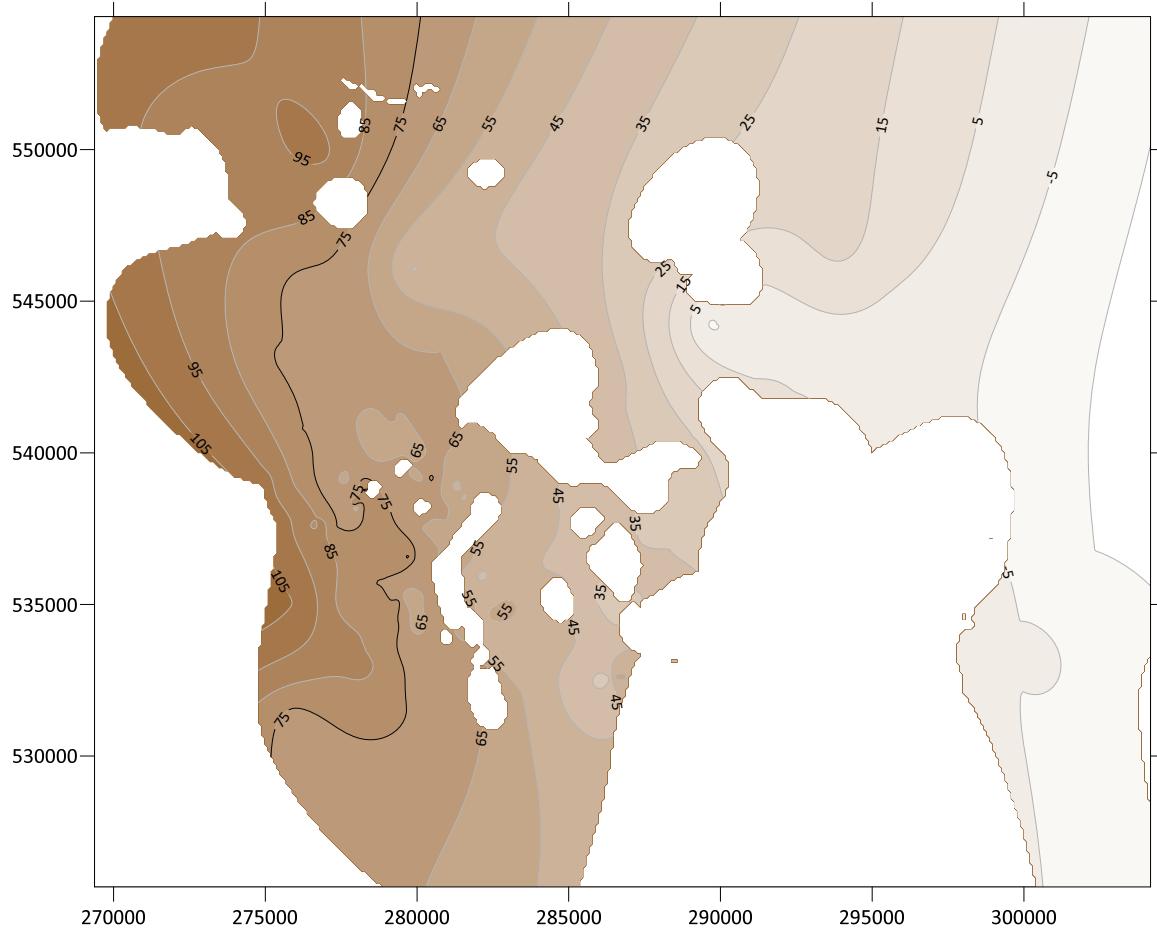


Рисунок А.3 – Карта-схема кровли урзугских отложений

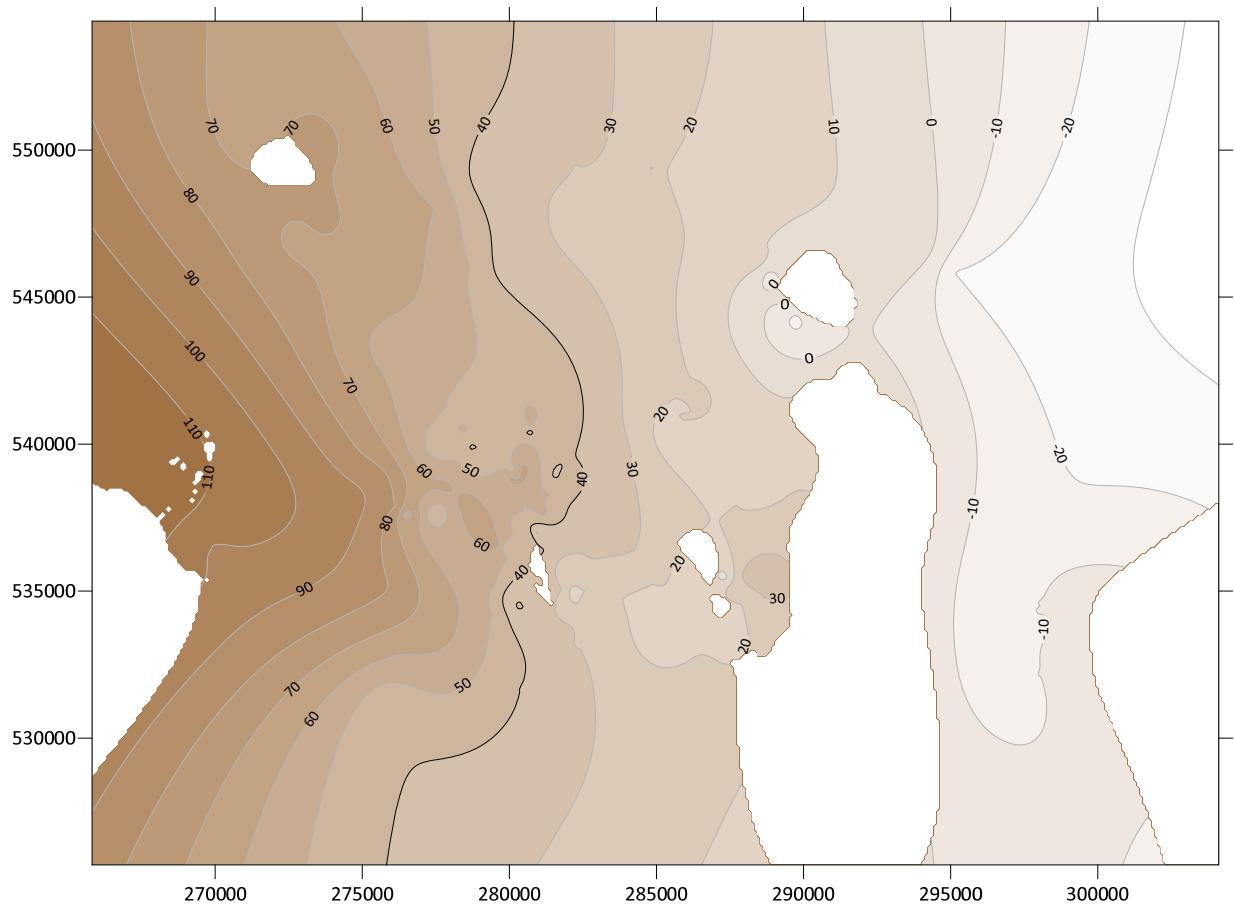


Рисунок А.4 – Карта-схема кровли падунских отложений

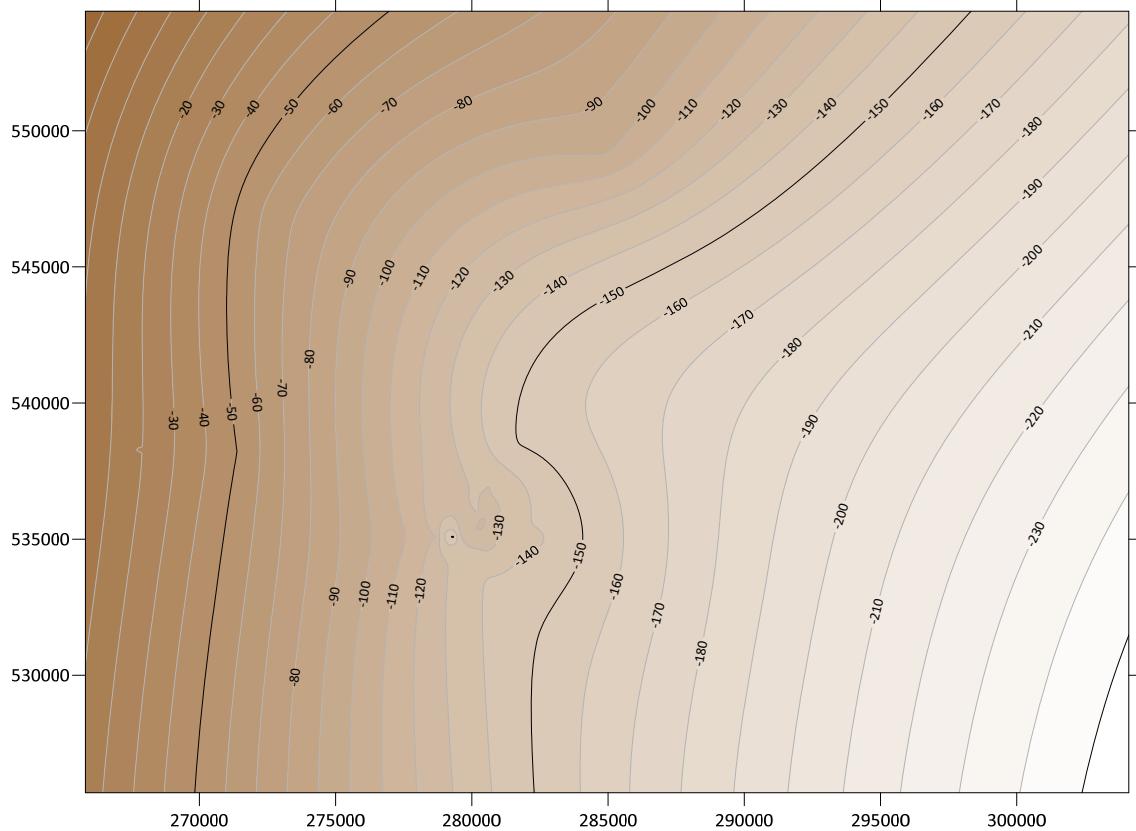


Рисунок А.5 – Карта-схема кровли мезенских отложений

Приложение Б

Метеорологические данные по метеостанции Кепино, использованные для
задания инфильтрационного питания

Таблица Б.1 – Годовая сумма осадков (Х) и принятые величины
инфилтратионного питания (I)

Дата	X, мм	I=0,25*X, мм	I, м/сут.	I, мм/сут.
2011	482	120,5	0,00026	0,26
2012	673	168,3	0,00037	0,37
2013	459	114,8	0,00025	0,25
2014	528	132,0	0,00029	0,29
2015	405	101,3	0,00022	0,22
2016	524	131,0	0,00029	0,29
2017	590	147,5	0,00032	0,32
2018	580	145,0	0,00032	0,32
2019	811	202,8	0,00044	0,44
2020	718	179,5	0,00039	0,39
2021	487	121,8	0,00027	0,27
2022	555	138,8	0,00030	0,30
2023	568	142,0	0,00031	0,31

Таблица Б.2 – Месячная сумма осадков (Х) и принятые величины
инфилтратионного питания (I) без учета (лет) и с учетом (зим)
снегонакопления

Дата	X, мм	I=0,25*X _{лет} , мм	I=0,25*X _{зим} , мм	I _{лет} , ММ/сут.	I _{зим} , ММ/сут.
1	2	3	4	5	6
31.12.2011	49	12,3	12,3	0,41	0,41
01.01.2012	24	6,0	0,0	0,20	0,00
01.02.2012	12	3,0	0,0	0,10	0,00
01.03.2012	11	2,8	0,0	0,09	0,00
01.04.2012	36	9,0	0,0	0,30	0,00
01.05.2012	64	16,0	49,0	0,53	1,63
01.06.2012	58	14,5	14,5	0,48	0,48
01.07.2012	108	27,0	27,0	0,90	0,90
01.08.2012	167	41,8	41,8	1,39	1,39
01.09.2012	53	13,3	13,3	0,44	0,44
01.10.2012	83	20,8	20,8	0,69	0,69
01.11.2012	53	13,3	0,0	0,44	0,00
01.12.2012	6	1,5	0,0	0,05	0,00

1	2	3	4	5	6
01.01.2013	6	1,5	0,0	0,05	0,00
01.02.2013	28	7,0	0,0	0,23	0,00
01.03.2013	10	2,5	0,0	0,08	0,00
01.04.2013	22	5,5	0,0	0,18	0,00
01.05.2013	12	3,0	34,3	0,10	1,14
01.06.2013	64	16,0	16,0	0,53	0,53
01.07.2013	59	14,8	14,8	0,49	0,49
01.08.2013	60	15,0	15,0	0,50	0,50
01.09.2013	24	6,0	6,0	0,20	0,20
01.10.2013	89	22,3	22,3	0,74	0,74
01.11.2013	50	12,5	0,0	0,42	0,00
01.12.2013	35	8,8	0,0	0,29	0,00
01.01.2014	19	4,8	0,0	0,16	0,00
01.02.2014	24	6,0	0,0	0,20	0,00
01.03.2014	47	11,8	0,0	0,39	0,00
01.04.2014	35	8,8	0,0	0,29	0,00
01.05.2014	65	16,3	68,8	0,54	2,29
01.06.2014	79	19,8	19,8	0,66	0,66
01.07.2014	39	9,8	9,8	0,33	0,33
01.08.2014	91	22,8	22,8	0,76	0,76
01.09.2014	56	14,0	14,0	0,47	0,47
01.10.2014	13	3,3	3,3	0,11	0,11
01.11.2014	30	7,5	0,0	0,25	0,00
01.12.2014	30	7,5	0,0	0,25	0,00
01.01.2015	31	7,8	0,0	0,26	0,00
01.02.2015	37	9,3	0,0	0,31	0,00
01.03.2015	19	4,8	0,0	0,16	0,00
01.04.2015	29	7,3	0,0	0,24	0,00
01.05.2015	25	6,3	50,3	0,21	1,68
01.06.2015	85	21,3	21,3	0,71	0,71
01.07.2015	36	9,0	9,0	0,30	0,30
01.08.2015	56	14,0	14,0	0,47	0,47
01.09.2015	26	6,5	6,5	0,22	0,22
01.10.2015	22	5,5	5,5	0,18	0,18
01.11.2015	26	6,5	0,0	0,22	0,00
01.12.2015	14	3,5	0,0	0,12	0,00
01.01.2016	10	2,5	0,0	0,08	0,00
01.02.2016	18	4,5	0,0	0,15	0,00
01.03.2016	10	2,5	0,0	0,08	0,00
01.04.2016	29	7,3	0,0	0,24	0,00
01.05.2016	55	13,8	40,5	0,46	1,35
01.06.2016	71	17,8	17,8	0,59	0,59
01.07.2016	74	18,5	18,5	0,62	0,62
01.08.2016	74	18,5	18,5	0,62	0,62
01.09.2016	40	10,0	10,0	0,33	0,33
01.10.2016	27	6,8	6,8	0,23	0,23
01.11.2016	29	7,3	0,0	0,24	0,00
01.12.2016	89	22,3	0,0	0,74	0,00
01.01.2017	35	8,8	0,0	0,29	0,00

Приложение В

Метеорологические данные по ГЛУ “Центральный”, и данные по водоотливу из
Саамского, Коашвинского и Ньоркпахского карьеров

Дата	Метеорологические данные			Водоприток к карьеру, м ³ /сут		
	X, мм	X _{жид} , мм	t°C	Саамский, м ³ /сут	Коашвинский, м ³ /сут	Ньоркпахский, м ³ /сут
1	2	3	4	5	6	7
01.01.2005	77,4	0	-11,8	543	2027,4	139,1
01.02.2005	51,5	0	-11,8	476	1668,1	144,9
01.03.2005	42,1	0	-13,4	390	1328,8	132,1
01.04.2005	114	85,5	-7,5	327	1405,8	88,1
01.05.2005	142,8	228,3	-2,6	3873	3146,2	499,9
01.06.2005	71,6	71,6	4,8	2847	4088,9	300,0
01.07.2005	124,6	124,6	9,7	1909	3973,7	388,4
01.08.2005	250,3	250,3	7,8	1721	4537,9	425,2
01.09.2005	292,6	292,6	1,6	2466	5266,3	350,7
01.10.2005	165,4	0	-2,1	2166	3833,0	382,7
01.11.2005	202,8	0	-5	1603	4094,3	425,0
01.12.2005	95,9	0	-10,3	889	3374,9	264,7
01.01.2006	63,1	0	-10,7	625	2602,4	159,6
01.02.2006	43,9	0	-13,2	565	1982,6	139,1
01.03.2006	45,4	0	-12,9	532	1566,3	96,0
01.04.2006	90,1	353,3	-5,6	388	1412,7	127,1
01.05.2006	69,1	422,4	-0,8	974	2103,6	343,5
01.06.2006	47,4	47,4	5,4	1418	3087,2	423,4
01.07.2006	106,9	106,9	6,2	1290	3061,1	471,3
01.08.2006	41,7	41,7	8,2	892	2773,9	424,9
01.09.2006	157,9	157,9	0,8	595	2758,3	208,5
01.10.2006	118,2	0	-5,8	577	3080,0	357,6
01.11.2006	73,3	0	-8,4	595	2660,6	294,5
01.12.2006	168,5	0	-8,3	600	2381,4	251,3
01.01.2007	96,7	0	-11,3	547	1713,6	239,1
01.02.2007	7,1	0	-15,9	370	1470,8	149,4
01.03.2007	88,4	0	-6,2	342	1369,6	135,3
01.04.2007	85,4	318,8	-6,9	436	1342,6	176,6
01.05.2007	108,7	427,5	-2,9	870	2121,3	373,5
01.06.2007	161,2	161,2	-0,3	2448	3671,9	782,7
01.07.2007	156,4	156,4	8,5	2530	4607,5	683,5
01.08.2007	142,1	142,1	8,2	1544	3345,1	432,1
01.09.2007	289,6	289,6	0,5	2318	4087,7	551,7
01.10.2007	231,6	0	-1,2	1372	4216,4	526,4
01.11.2007	115,7	0	-9	881	3921,6	493,0
01.12.2007	87,4	0	-7,1	707	3241,8	336,3
01.01.2008	110,1	0	-9,4	467	2545,8	236,7

1	2	3	4	5	6	7
01.02.2008	77,1	0	-11,2	213	2063,8	183,1
01.03.2008	78,4	0	-11,7	236	1711,5	193,8
01.04.2008	45,8	373,05	-8,9	312	1552,5	191,5
01.05.2008	50	423,05	-4,2	356	1900,3	319,2
01.06.2008	64,6	64,6	3,4	2261	3093,1	402,1
01.07.2008	138,7	138,7	6,8	2288	3827,9	613,3
01.08.2008	158,6	158,6	3,6	1315	3666,0	524,7
01.09.2008	96,5	96,5	-0,2	972	3427,5	432,1
01.10.2008	138,9	0	-3,2	947	4073,4	382,0
01.11.2008	118,5	0	-8,6	672	3424,2	469,4
01.12.2008	128	0	-6,8	558	2636,1	303,6
01.01.2009	64,7	0	-12,1	503	2004,7	227,5
01.02.2009	41,6	0	-13,7	445	2030,6	173,3
01.03.2009	55,4	0	-11	348	1603,9	166,2
01.04.2009	83,4	315,25	-8,4	343	1555,3	142,3
01.05.2009	60,4	375,65	-0,6	1698	2301,4	371,5
01.06.2009	76,7	76,7	2,5	2117	2852,1	550,0
01.07.2009	147,7	147,7	6,6	1344	3255,2	467,8
01.08.2009	134,2	134,2	7,7	1347	3337,7	381,8
01.09.2009	222,9	222,9	2,8	1068	3784,3	429,5
01.10.2009	56,9	0	-5,4	847	3335,6	362,1
01.11.2009	98,8	0	-6	552	2609,6	304,1
01.12.2009	64,2	0	-12,3	432	2231,7	195,5
01.01.2010	16,8	0	-12,8	471	1725,6	165,5
01.02.2010	57,7	0	-16,7	408	1589,3	158,5
01.03.2010	75,2	0	-12,9	388	1289,7	138,1
01.04.2010	80,8	225,2	-5	325	1485,4	146,8
01.05.2010	81,2	306,4	1,7	2073	3105,2	716,1
01.06.2010	118,9	118,9	2,6	1226	3648,6	735,9
01.07.2010	123,1	123,1	10,7	1312	4338,3	555,1
01.08.2010	159,5	159,5	4,8	1032	4218,8	429,8
01.09.2010	222,9	222,9	2	860	4673,9	378,8
01.10.2010	169,7	0	-3,6	850	4365,9	369,6
01.11.2010	64,6	0	-9,9	685	3716,8	350,2
01.12.2010	47	0	-12,7	495	2767,3	230,2
01.01.2011	60,6	0	-13,7	354	1988,4	192,2
01.02.2011	21,1	0	-15,7	409	1714,2	186,2
01.03.2011	63,9	0	-10,4	318	1471,8	160,5
01.04.2011	48,4	237,65	-4,6	320	1677,1	193,9
01.05.2011	99,1	336,75	-1,2	980	2314,6	460,5
01.06.2011	74,9	74,9	7,4	2440	3392,7	719,8
01.07.2011	133,3	133,3	9,9	1097	3801,4	544,2
01.08.2011	150,3	150,3	6	900	3754,2	439,0
01.09.2011	134,2	134,2	2,6	914	3850,2	387,1
01.10.2011	188	0	-1,2	1027	5476,5	660,6
01.11.2011	89,9	0	-5,9	1739	4211,7	522,5
01.12.2011	157,5	0	-7,9	792	3691,3	349,7

1	2	3	4	5	6	7
01.01.2012	91,6	0	-12,1	455	2854,1	227,3
01.02.2012	34,9	0	-14,1	510	2154,1	226,9
01.03.2012	60,1	0	-9,9	407	1762,1	192,9
01.04.2012	71,3	346,65	-7,3	330	1702,0	206,9
01.05.2012	69,9	416,55	-1,7	2464	3677,4	661,0
01.06.2012	143,1	143,1	3,8	2513	5646,6	706,6
01.07.2012	156,5	156,5	7,1	1760	5817,6	723,2
01.08.2012	140,4	140,4	5,7	1148	5156,8	580,0
01.09.2012	233,4	233,4	1,1	933	5612,6	510,5
01.10.2012	253	0	-3,7	1081	7051,2	675,7
01.11.2012	205,7	0	-7,1	687	5260,5	416,9
01.12.2012	35,7	0	-13,3	459	3799,3	327,5
01.01.2013	95	0	-10,9	330	3010,7	325,5
01.02.2013	69,5	0	-10,7	447	2665,7	280,5
01.03.2013	38,1	0	-15,3	282	2146,2	245,9
01.04.2013	88,4	392,7	-6,7	460	2350,6	323,8
01.05.2013	67,8	460,5	0,1	1200	3032,3	662,1
01.06.2013	70,8	70,8	7	2230	5088,9	864,5
01.07.2013	102,2	102,2	9	1392	5100,7	617,5
01.08.2013	122,5	122,5	8,4	1450	4654,2	433,9
01.09.2013	140,3	140,3	3,2	856	4378,3	425,0
01.10.2013	143,1	0	-4,6	516	4514,3	427,9
01.11.2013	89,6	0	-8,1	426	4338,1	389,1
01.12.2013	140,8	0	-8,7	422	3333,9	283,5
01.01.2014	31,4	0	-12,5	492	2660,8	300,0
01.02.2014	62,2	0	-9,1	370	2175,3	301,1
01.03.2014	99,5	0	-9,1	295	1880,8	249,7
01.04.2014	142,6	354,6	-7,8	513	2054,0	304,8
01.05.2014	99,3	453,9	-2,2	1230	3185,0	612,2
01.06.2014	76,9	76,9	2,2	1699	5376,7	971,0
01.07.2014	74,2	74,2	11	1490	5675,3	728,7
01.08.2014	238,1	238,1	8	1262	5915,1	657,3
01.09.2014	165,8	165,8	1,8	1372	6415,9	672,9
01.10.2014	63,4	0	-5,5	1120	6083,9	616,7
01.11.2014	70	0	-6	766	5312,2	396,0
01.12.2014	125,7	0	-10,3	514	4441,2	280,1
01.01.2015	53,8	0	-12,6	442	3640,8	250,1
01.02.2015	79,5	0	-11,1	462	2941,7	253,8
01.03.2015	97,1	0	-7,8	337	2615,1	224,8
01.04.2015	82,5	286	-6,3	342	2317,8	315,8
01.05.2015	85,9	371,9	0,2	760	4691,4	700,5
01.06.2015	194	194,0	2,6	2658	6896,7	726,3
01.07.2015	172,4	172,4	3,9	1802	6349,5	524,4
01.08.2015	132,9	132,9	6,7	1603	6809,3	551,6
01.09.2015	230,5	230,5	4,2	1125	6764,4	437,5
01.10.2015	116,6	0	-3,5	665	6890,3	473,4
01.11.2015	93,4	0	-8,2	770	6256,7	558,6

1	2	3	4	5	6	7
01.12.2015	57,1	0	-10,1	562	5058,1	392,9
01.01.2016	57,8	0	-15,2	570	3765,6	392,9
01.02.2016	201	0	-9,4	387	3308,0	305,3
01.03.2016	59,9	0	-8,6	399	2882,8	277,0
01.04.2016	69	327,4	-4,5	362	2874,4	341,7
01.05.2016	46,2	373,6	2,1	1739	4943,0	876,8
01.06.2016	174,4	174,4	4,1	2099	7101,1	658,8
01.07.2016	129,9	129,9	11,6	1358	6773,1	541,7
01.08.2016	280,5	280,5	7,3	1464	7835,5	742,8
01.09.2016	243,4	243,4	2,2	1068	7912,2	676,6
01.10.2016	70,1	0	-1,9	1045	7780,6	650,2
01.11.2016	98,1	0	-8,1	852	6067,8	570,0
01.12.2016	130,6	0	-9,2	497	4636,6	350,8
01.01.2017	133,9	0	-11,8	421	3444,1	379,8
01.02.2017	53,7	0	-10,8	206	2911,9	357,1
01.03.2017	179,2	0	-9,9	293	2671,5	304,9
01.04.2017	93,1	379,35	-10	220	2363,3	308,0
01.05.2017	132,2	511,55	-6,2	204,4	2544,5	378,0
01.06.2017	141,8	141,8	1,1	1192,5	3775,0	828,2
01.07.2017	140,3	140,3	9,8	2482,8	6039,8	958,0
01.08.2017	291,4	291,4	6,1	1652	6508,4	680,3
01.09.2017	76,5	76,5	2,2	1384	6858,7	698,3
01.10.2017	207,6	0	-4,1	924	7051,3	868,3
01.11.2017	245,3	0	-7,4	541,3	6233,1	659,8
01.12.2017	184,4	0	-9,4	475	5022,7	474,6
01.01.2018	138,8	0	-10,8	336	3885,1	412,8
01.02.2018	112,1	0	-12,9	250	2898,9	385,0
01.03.2018	94	0	-14,0	145	2551,1	300,7
01.04.2018	84,7	533,45	-6,4	95	2748,1	338,2
01.05.2018	47,1	580,55	1,6	1261	5016,6	767,1
01.06.2018	129,5	129,5	5,7	2488	6922,6	870,7
01.07.2018	20,4	20,4	16,3	1981	6618,9	679,4
01.08.2018	109,1	109,1	6,4	1207	5620,2	452,9