

На правах рукописи



**Полякова Елена Викторовна**

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ  
СРЕДСТВАМИ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА:  
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

Специальность 1.6.21. Геозкология

Автореферат на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Архангельск, 2021

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук (ФИЦКИА УрО РАН)

**Научные консультанты:** **Кутинов Юрий Григорьевич**

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН

**Малов Александр Иванович**

доктор геолого-минералогических наук, директор Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН, главный научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН

**Официальные оппоненты:** **Хуторской Михаил Давыдович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса, главный научный сотрудник ФГБУН Геологический институт РАН (ГИН РАН), заслуженный деятель науки РФ

**Тронин Андрей Аркадьевич**

доктор геолого-минералогических наук, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН (НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН)

**Экзарьян Владимир Нишанович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

**Ведущая организация:** **Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН)**

**Защита диссертации состоится 12 мая 2022 г. в 14 часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.054.01 при ФГБУН «Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева Российской академии наук» по адресу: 109004, Москва, ул. Николаямская, д. 51.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Институте геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН по адресу: 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

Автореферат диссертации разослан «.....» ..... 2022 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,  
кандидат географических наук

Е.В. Булдакова

### Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Осуществление хозяйственной деятельности в северных регионах РФ сталкивается с определенными трудностями в силу отсутствия актуальной и объективной геопространственной информации об опасных природных явлениях и процессах, а также о вероятности их развития (Амбросимов, Сизов, 2013; Полякова, 2018). Экстенсивный характер лесопользования и низкая скорость лесовозобновления приводят к быстрому сокращению лесных площадей (Исаченко, 1995). Существенное влияние на северные экосистемы оказывает разведка и разработка месторождений полезных ископаемых (Миняев, Юдахин, 1996). Например, на территории Архангельской области открыты и в настоящее время разрабатываются месторождения алмазов (месторождения им. М.В. Ломоносова и В. Гриба), бокситов (Северо-Онежский бокситовый район), углеводородов и т.д. Объемы добычи сырья, потребляемой продукции и сопутствующих отходов, определяют главные изменения естественного баланса массы и энергии в природной среде. Определенное влияние на северные экосистемы оказывают урбанизация и развитие транспортной сети. Интенсивное хозяйственное освоение северных территорий часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали (Опасные экзогенные процессы, 1999). В связи с этим весьма важной представляется разработка и реализация экологически сбалансированного подхода к освоению ресурсов геологической среды (Губайдуллин, 2002).

На изучение и решение вопросов сохранения необходимой для нормальной и продуктивной жизнедеятельности геологической среды, при максимальном и эффективном использовании ее ресурсов для нужд человечества, направлены геоэкологические исследования (Проблемы рационального..., 1988; Козловский, 1989; Кузнецов и др., 1991; Сычев, 1991; Бгатов, 1993; Голодковская, Куринов, 1994; Трофимов и др., 1994; Гарецкий, Каратаев, 1995; Красилова, 1997; Богословский, Жигалин, 1998; Соломкина, 2001; Губайдуллин, 2002; Моисеев, 2007; Осипов, 2017 и др.; Кутинов и др., 2019; Кутинов и др., 2020). Общей целью геоэкологических исследований является оценка экологического состояния геологической среды (Андросова, 2000).

В работе (Руш, 2006, с. 7) отмечается, что «при проведении процедуры комплексной геоэкологической оценки конкретной территории, подверженной воздействию техногенной нагрузки, необходимо использовать современные подходы и методы исследования объектов окружающей среды, наиболее апробированные в определенных условиях, в целях получения достоверной информации об изучаемом объекте».

Актуальным и востребованным направлением, позволяющим получать оперативную информацию о состоянии окружающей среды, является мониторинг природных и техногенных объектов на территориях горнодобывающих и промышленных комплексов с применением данных дистанционного зондирования Земли (Галченко и др., 2020). Однако космо- и аэрофотосъемка могут быть малоэффективными на лесопокрытых территориях. В то же время предвосхищение, предвидение возможного развития нежелательных и даже опасных экзогенных процессов на территориях с планируемой хозяйственной деятельностью, является не менее актуальной задачей. Реакция геологической среды на любой вид природного или антропогенного воздействия напрямую зависит от рельефа местности. Рельеф, являясь связующим звеном между внутренним (геологическим) строением и внешней окружающей средой, раскрывает потенциальные возможности территории к перераспределению осадочного материала по поверхности, определяя зоны возможного смыва, транзита и накопления различных веществ, в том числе и загрязняющих геологическую среду. Оценка роли рельефа в развитии экзогенных процессов требует его количественной характеристики. В этом аспекте одним из наиболее

объективных и эффективных подходов является геоморфометрический анализ его цифрового аналога – цифровой модели рельефа.

**Цель работы:** проведение геоэкологического анализа территории Севера Русской плиты на основе цифрового моделирования рельефа для оценки потенциальной вероятности развития опасных геологических процессов и явлений в свете возрастающей антропогенной нагрузки.

**Основные задачи исследований:**

1. Проанализировать современные тенденции и подходы к проведению геоэкологических исследований в России и за рубежом.

2. Провести геоморфометрический анализ построенной на основе ASTER GDEM v.2 цифровой модели рельефа; произвести подбор геоморфометрических параметров для геоэкологической оценки состояния природной среды на примере Архангельской области.

3. На основе выбранных геоморфометрических параметров выделить территории с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов (зоны сноса материала), с возможным проявлением эрозионных процессов (зоны транзита материала) и с потенциальным развитием аккумулятивных процессов (зоны накопления материала); оценить долю каждой зоны в пределах региона исследований.

4. Оценить вероятность активизации карстового процесса на основе применения метода обнаружения бессточных впадин, используемого при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа для устранения ошибок; показать состоятельность данного метода.

5. Отразить взаимосвязь индекса расчлененности рельефа как объективной количественной характеристики неоднородности территории с химическим составом подземных вод.

6. Установить основной характер проявления структур фундамента в современном рельефе Севера Русской плиты; показать возможность применения цифрового моделирования рельефа в структурно-геологических исследованиях.

**Фактический материал и методы исследований.** В работе в качестве основы всех геоморфометрических расчетов применялась цифровая модель рельефа, построенная для территории Архангельской области на основе глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2. Для исходной модели была проведена процедура подготовки, заключающаяся в заполнении недостающих данных значениями модели GMTED2010 с искусственным уменьшением размера ячейки до 1 угловой секунды; устранении артефактов, ошибок и шумов; проведении гидрологической коррекции. Для получения данных о глубине залегания фундамента использовались материалы отчетов из фондов Архангельского филиала ФБУ «ТФГИ по СЗФО».

Для проведения геоэкологического анализа территории исследований использовались методы цифрового моделирования рельефа, математической статистики, а также картографический материал. Расчеты, обработка и подготовка картографического материала осуществлялись в программных продуктах SAGA GIS и ESRI ArcGIS.

**Личный вклад автора.** В диссертационной работе приводятся результаты многолетних исследований, выполненных лично автором, при его участии, или под его руководством. Совместно с сотрудниками лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы была построена цифровая модель рельефа на территорию Архангельской области. Автору принадлежат: выбор направления исследования и постановка проблемы, аналитический обзор литературы, разработка обобщенной концепции геоморфометрического подхода в геоэкологических исследованиях природной среды, формулирование теоретических, методологических и методических положений геоэкологического анализа территории, а также подготовка картографического материала. Автор в период с 2000 по 2020 гг. являлся руководителем и участником экспедиционных

исследований, проводимых в приарктических и арктических регионах страны с целью наземной верификации картографического материала и данных дистанционного зондирования, а также проведения GPS-замеров для проверки точности цифровой модели рельефа.

**Основные защищаемые положения:**

1. Геоморфометрический анализ рельефа и ГИС-технологии являются неотъемлемой частью современных геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности количественных методов расчета и охвата больших территорий одновременно.

2. На основе объединения кластеров максимальных значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа выделены участки с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала и составляющие порядка 18 % исследуемой территории. На основе объединения кластеров средних значений тех же параметров выделены участки с возможным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала и составляющие порядка 33 % территории. На основе объединения кластеров минимальных значений параметров, а также максимальных значений индекса влажности выделены участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующих зонам накопления материала и составляющие порядка 35 % территории исследования.

3. Метод обнаружения бессточных впадин, используемый при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа с целью устранения ошибок, может быть применен для выделения зон вероятной активизации карстового процесса, что особенно актуально для лесопокрытых северных территорий с возрастающей антропогенной нагрузкой. Максимальная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста.

4. На равнинных территориях индекс расчлененности рельефа отражает химический состав подземных вод. Высокая расчлененность рельефа, малая толща перекрывающих коренные породы четвертичных отложений, отсутствие водоупора способствуют опреснению подземных вод за счет проникновения ультрапресных атмосферных осадков. Низкая расчлененность рельефа обуславливает невысокую интенсивность водообмена и, как следствие, – более высокую минерализацию подземных вод.

5. Цифровое моделирование рельефа позволяет проводить структурно-геологические исследования. На основе сопоставления цифровой модели рельефа фундамента и цифровой модели дневной поверхности выделены формы проявления структур фундамента в современном рельефе Архангельской области. Прямой характер наследования имеет 61 % территории, обратный – 25 %, районы, где наследование не проявляется, соответствуют 14 % территории области.

**Научная новизна исследований:**

- Впервые создана детальная корректная цифровая модель рельефа для территории Архангельской области на основе глобальной цифровой модели ASTER GDEM v.2. Релевантность доказана инструментально.

- Теоретически обоснована возможность применения геоморфометрического анализа рельефа в геоэкологических исследованиях Севера Русской плиты. Приведены примеры практического применения.

- Впервые проведена геоэкологическая оценка вероятности развития эрозионных и аккумулятивных процессов на территории Архангельской области на основе геоморфометрического анализа рельефа. Выделены зоны сноса, транзита и накопления материала, в том числе и загрязняющих веществ, а также территории, склонные к подтоплению во время паводков и предрасположенные к заболачиванию.

- Предложен новый способ для выделения зон вероятной активизации карстового процесса, основанный на расчете плотности бессточных впадин. Ранее метод обнаружения бессточных впадин использовался только при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа с целью устранения в ней ошибок.

- Впервые построена цифровая модель рельефа фундамента Севера Русской плиты, проведено ее сопоставление с цифровой моделью дневной поверхности и выделены формы отражения фундамента в современном рельефе Архангельской области. Показана возможность проведения структурно-геологических исследований средствами цифрового моделирования рельефа.

**Практическая значимость исследований.** В работе изложен научно обоснованный подход к проведению геоэкологических исследований с применением современного объективного аппарата геоморфометрии. Для труднодоступных лесопокрытых северных территорий геоморфометрический подход является одним из определяющих способов проведения анализа состояния геологической среды. Геоморфометрический модульный аппарат, заложенный в программный комплекс SAGA GIS, является мощным инструментом для решения различных глобальных, региональных и узконаправленных задач. В частности, результаты выполненных исследований были использованы для проведения мониторинговых работ по оценке состояния и загрязнения объектов окружающей среды, находящихся на территории ОАО «Архангельский ЦБК» и в пределах его воздействия.

Работа выполнялась по темам ФНИР «Изучение структуры и динамики абиотических факторов и оценка их влияния на окружающую среду северных регионов» (№ 01201256211), «Изучение межгеосферных процессов в районах тектонических структур и узлов их пересечений в геологических условиях древних платформ на примере Архангельской области» (№ АААА-А18-118012390305-7); была поддержана: программой Президиума РАН «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов», проект № 12-П-5-1009 «Фундаментальные основы экологически безопасных технологий освоения природных ресурсов западно-арктического сектора Российской Федерации» (№ 01201256211); Программой фундаментальных исследований УрО РАН «Арктика» (№ 12-5-3-002-АРКТИКА), проект «Геоэкологическое районирование арктических и приарктических территорий РФ для рационального освоения Арктики» (№ 01201268728); Грантами РФФИ № 09-05-00547-а «Влияние разработки алмазов на территории Беломорско-Кулойского плато на состояние естественных экосистем (на примере растительного покрова долины реки Золотица)», № 14-05-98803-р\_север\_а «Изменение геоэкологических условий при глубоком водопонижении на карьере Ломоносовского ГОКа в Архангельской области», № 14-05-00008-а «Совершенствование методики определения возраста подземных вод по уран-изотопным данным», № 18-05-60024-Арктика «Анализ состояния природной среды равнинных территорий Арктической зоны РФ с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа».

К диссертационной работе прилагаются акты об использовании результатов исследований: в научно-исследовательской деятельности ФГБУН ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России при разработке аванпроекта по СЧ ОКР «Модернизация и развитие системы валидационных подспутниковых наблюдений и создание на ее основе многофункциональной системы сквозного контроля качества целевой информации и аппаратуры космических комплексов и космических систем ДЗЗ»; при проведении научно-исследовательских работ ОАО «Архангельский ЦБК»; при выполнении проектов: «ГИС Соловецкого архипелага» с Государственным автономным учреждением Архангельской области «Управление информационно-коммуникационных технологий

Архангельской области», «Охрана лесов в Баренцевоморском регионе», «Бореальная лесная платформа – баланс интересов сохранения высоких природоохранных ценностей и эффективного лесного хозяйства в бореальных лесах», «Сохранение лесов высокой природоохранных ценностей 2-й категории» с Представительством Всемирного фонда дикой природы в Архангельской области; о практическом использовании в учебном процессе Научно-образовательного центра ФГБУН ФИЦКИА РАН при проведении курса «ГИС-технологии в геоэкологических исследованиях» по направлению подготовки 05.06.01 – Науки о Земле.

**Достоверность результатов** определяется надежностью построенной цифровой модели рельефа. Проверка релевантности построенной ЦМР Архангельской области осуществлялась сопоставлением с точками плановой съемочной сети открытых векторных данных ГИС Панорама (где в качестве геодезической основы в плановом отношении выступали пункты государственной геодезической сети (точность 0,1 мм), в высотном – пункты государственной нивелирной сети (точность 0,8 мм)); с цифровой моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200000 в ПО ГИС GRASS; а также с проведенными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора в ходе экспедиционных работ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на XV Всероссийской конференции с международным участием «Геологические опасности» (Архангельск, ИЭПС УрО РАН, 2009); международном симпозиуме «Экология арктических и приарктических территорий» (Архангельск, ИЭПС УрО РАН, 2010); III Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения» (Апатиты, 2010); VII Северном социально-экологическом конгрессе «Приращение богатств России и качество жизни северян» (Архангельск, СГМУ, 2011); Всероссийской конференции с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (Архангельск, САФУ им. М.В. Ломоносова, 2013); I Всероссийской научно-практической конференции «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга» (Воронеж, ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2014); Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в.» (Архангельск, АНЦ, ИЭПС УрО РАН, 2014); Всероссийской конференции с международным участием «Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата» (Архангельск, САФУ им. М.В. Ломоносова, 2014); II Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, СФУ, 2015); Международной научной конференции «Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны» (Архангельск, АНЦ, 2015); VIII-XVIII Открытых Всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Москва, ИКИ РАН, 2008-2021 гг.); XVIII, XIX, XXI Сергеевских чтениях (Москва, ИГЭ им. Е.М. Сергеева, 2016, 2017 гг., Пермь, 2019); XX международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков «ГЕОРИСК – 2018» (Москва, ИГЭ им. Е.М. Сергеева, 2018); Международном симпозиуме ESA Living Planet 2019 (Милан, 2019); VI Международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» (Севастополь, 2019); V Международной конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии, горной промышленности и экономики» ITES&MP-2019 (Москва, 2019); Международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» (Санкт-Петербург, 2020); Всероссийской конференции с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики» (Архангельск, 2020); VIII Всероссийской

научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2021).

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 58 работ, в том числе 5 монографий, 26 статей (11 – в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 15 – включенных в Перечень ведущих научных журналов ВАК).

**Соответствие паспорту научной специальности:** диссертационное исследование соответствует пунктам 1.8, 1.11-1.15, 1.17 паспорта специальности ВАК 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки).

**Структура и объем диссертации:** диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (385 наименований, из них 93 – иностранные источники), приложения. Общий объем: 314 страниц, включая 139 рисунка и 29 таблиц.

**Благодарности:** автор выражает огромную благодарность научному консультанту, д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинову за своевременные, ценные консультации и дискуссии; д.г.-м.н. А.И. Малову за помощь в написании отдельных глав; директору ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, член-корр. РАН И.Н. Болотову; коллективу лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы; отдельная благодарность к.г.-м.н. А.Л. Минееву за помощь в подготовке картографического материала и совместную деятельность; д.ф.-м.н. Д.М. Ермакову за критическое редактирование текста; бесконечная признательность семье за поддержку и понимание; а также всем заинтересованным лицам, выразившим неравнодушие к данной работе.

### Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность проведения геоэкологических исследований на территории Севера Русской плиты на основе геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа, сформулирована цель исследования, поставлены задачи, обозначены основные защищаемые положения.

В **первой главе** представлен аналитический обзор возможности применения цифрового моделирования рельефа для геоэкологических исследований. Рассмотрены современные тенденции и подходы к проведению геоэкологических исследований в России и за рубежом. Анализ принципов и приемов геоэкологических исследований показал, что в их основе лежит, как правило, учет антропогенного воздействия и практически отсутствует анализ природного состояния окружающей среды, в первую очередь, геологической (Кутинов и др., 2019). В то же время, надежность (достоверность) геоэкологической оценки территории существенно возрастает при объективном анализе природных факторов. Техногенные процессы развиваются на фоне естественных, в основе своей они субъективны и наложены на природную среду. Рельеф выступает перераспределителем влаги, тепла, света (Неуструев, 1930) и продуктов выветривания; он ответственен за перенос растворимых солей (Полынов, 1934), а также литодинамических потоков, что обеспечивает скопление в зонах аккумуляции осадочного материала и мелкодисперсных частиц почв (Ковда, 1985; Martz, de Jong, 1988). Формы рельефа связаны между собой процессами денудации (сноса) и аккумуляции (накопления материала), а также геохимическим потоком веществ. Оценка роли рельефа в развитии экзогенных процессов невозможна без его количественной характеристики. В этом аспекте объективным и эффективным представляется геоморфометрический анализ его цифрового аналога – цифровой модели рельефа.

Проведение геоэкологических исследований средствами цифрового моделирования рельефа следует осуществлять по алгоритму, представленному на рисунке 1. Для проведения геоморфометрического анализа территории исследования была выбрана модель ASTER GDEM v2. Программным инструментом для расчетов выступила SAGA GIS, находящаяся в свободном доступе на <http://www.saga-gis.org>.



Рис. 1. Блок-схема методики проведения геоэкологических исследований на основе цифрового моделирования рельефа, по (Полякова, 2018)

Показано, что определяющим фактором возникновения любых экзогенных процессов является не столько высота, сколько угол наклона поверхности. Поскольку сам уклон поверхности является причиной возникновения эрозии (Михайлов, 2000), то его величина во многом определяет интенсивность эрозионных процессов. Интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона.

Важной характеристикой рельефа является также и экспозиция склонов, т.к. этот параметр определяет их теплообеспеченность и, как следствие, особенности протекания здесь эрозионных процессов (Киркби, 1984). Теплообеспеченность склонов в дальнейшем можно оценить по таким топо-климатическим параметрам, как потенциальная солнечная радиация и фотосинтетически активная радиация.

С точки зрения роли рельефа в процессах перемещения материалов (в данном случае воды и переносимых ей твердой и растворимой фаз), водосборная площадь – это параметр, описывающий склонность некоторого участка (ячейки растра) к получению воды, а локальный уклон – это параметр, описывающий склонность к отторжению воды (Geomorphometry, 2009).

Показатель индекса баланса геомасс выступает в качестве предиктора возникновения опасных склоновых процессов (оползни, обвалы, осыпи), поскольку раскрывает топографические предпосылки к разрушению и отложению грунтов (Готов, 2013). Данный показатель позволяет выявить участки с высокой вероятностью развития гравитационных склоновых процессов.

Зоны сноса, транзита и аккумуляции хорошо описываются разными видами кривизн. Грамотное их сочетание позволяет с точностью до исходного разрешения ЦМР обозначать места возможного сноса, переноса и накопления различного материала, в том числе и загрязняющих веществ. Так, например, для проведения мониторинговых работ по оценке состояния и загрязнения объектов окружающей среды, находящихся на территории ОАО «Архангельский ЦБК» и в пределах его воздействия, на основе сумм кривизн (классификация Треха) были выделены зоны аккумуляции загрязняющих веществ (рис. 2).

Показатель расчлененности рельефа взаимосвязан с химическим составом подземных вод. Высокая расчлененность рельефа позволяет ультрапресным атмосферным водам достигать водоносных толщ и опреснять их. Низкая расчлененность рельефа обуславливает невысокую интенсивность водообмена и более высокую минерализацию подземных вод (Зверев, 2006).

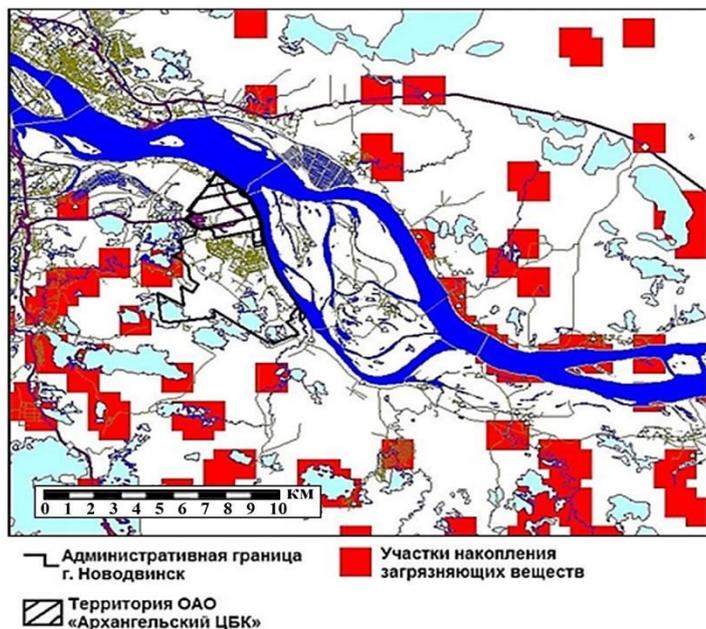


Рис. 2. Зоны аккумуляции загрязняющих веществ в окружении г. Новодвинска, по (Полякова и др., 2021)

Расчет геоморфометрических параметров рельефа позволяет создавать комплект монофакторных геоэкологических карт, каждая из которых характеризует территорию с точки зрения предпосылок рельефа, иллюстрируя зоны сноса, транзита и накопления осадочного материала, степень закарстованности, увлажненности и расчлененности. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции на различных участках исследуемой территории. В то же время, нецелесообразно делать выводы о возможности проявления опасных процессов, используя значения только одного показателя. Корректнее использовать комбинации параметров, и, применив ряд логических и математических процедур, проводить вероятностное моделирование проявления экзогенных геологических процессов.

Цифровое моделирование рельефа может применяться не только в геоэкологических, но и в структурно-геологических исследованиях, поскольку, при сравнительно малых затратах, дает возможность выделять древние геологические структуры. Подобные структуры проявляются в современном рельефе благодаря следующим факторам:

- неотектонической унаследованности структурных планов более древнего заложения (Губин, Коркин, 1986; Кутинов, 1991; Милашев, 1979; Тяпкин, Кивелюк, 1982);
- за счет процессов препарирования агентами денудации зон повышенной проницаемости, либо за счет так называемого эффекта просвечивания – приспособления поверхностных экзогенных процессов к границам скрытых глубинных масс различной плотности (Кутинов, 1991).

Помимо прочего, применение геоморфометрического анализа рельефа имеет и самостоятельное значение, поскольку многие структурные формы, в том числе и рудоконтролирующие, устанавливаются лишь с помощью геоморфологических методов (Волчанская, Сапожникова, 1990; Милашев, 1979, 1990).

**Таким образом, геоморфометрический анализ рельефа и ГИС-технологии являются неотъемлемой частью современных геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности количественных методов расчета и охвата больших территорий одновременно (первое защищаемое положение).**

Во **второй главе** приведена природно-антропогенная характеристика района исследований. Здесь рассматриваются географическое положение региона, структурно-тектонические, геолого-литологические, геоморфологические, геоэкологические, ландшафтно-климатические и почвенно-растительные условия, а также приводятся

основные факторы техногенного воздействия на природную среду Архангельской области. Отмечено, что в данном исследовании Север Русской плиты рассматривается в пределах административных границ Архангельской области (без Ненецкого автономного округа). Это сделано для удобства представления картографического материала и проведения расчетов. Кроме того, Архангельская область по своим геолого-географическим, биоклиматическим параметрам и степени техногенной и антропогенной нагрузки является представительной многофакторной моделью реакции окружающей среды на различные негативные антропогенные воздействия.

В **третьей главе** дается геоэкологическая оценка вероятности проявления эрозионных процессов на территории Архангельской области на основе геоморфометрического анализа рельефа.

Считается, что в естественных северотаежных ландшафтах с локальной антропогенной деятельностью эрозионные процессы протекают достаточно медленно и находят слабое отражение в формах рельефа (Гофаров и др., 2005). Так, на Карте районирования территории России по степени экстремальности развития эколого-геоморфологических ситуаций, составленной Институтом географии РАН в масштабе 1:9000000 (Карта..., 2006), интенсивность эрозионных процессов северотаежной зоны в основном оценивается как «очень слабая» и «слабая», а экзодинамические условия (сейсмические и экзогенные) как «в целом благоприятные». Однако ситуация коренным образом изменяется при нарушении целостности растительного покрова, что неизбежно при современных методах хозяйственного освоения данных территорий. Кроме того, глобальные изменения среднегодовых температур, особенно ярко проявляющихся в северных регионах, зачастую могут являться первопричиной развития различных генетически связанных эрозионных процессов (Амбросимов, Сизов, 2013).

Природной тенденцией изменения условий функционирования геологической среды северных регионов является процесс глобального потепления. Последствия воздействия данного процесса на геологическую среду следующие: увеличение скорости денудационных процессов (заболачивание, активизация карста, абразия берегов, плоскостной смыв и т.п.); изменение русел рек, аккумуляция донных отложений и дельтовых комплексов; изменение конфигурации и характера береговой линии («демпфера отрицательных воздействий»); изменение гидрологического режима подземных вод и зон аэрации пресных и минерализованных вод; увеличение выноса твердых взвешенных частиц (твердый сток). Наложение этих двух процессов – антропогенного и природного, – требует тщательного изучения, учета их последствий, особенно синергетических эффектов (Кутинов и др., 2012).

Лисецкий Ф.Н. отмечает, что пространственное ГИС-моделирование водной эрозии является приоритетным направлением в эрозионной тематике и открывает новые возможности для наиболее полного представления о геоморфологических предпосылках развития эрозионных процессов (Лисецкий, 2013). Кроме того, ГИС-анализ играет важную роль в интеграции методов наблюдения и моделирования и, тем самым, дает возможность прогнозирования, что, в свою очередь, может привести к снижению негативного воздействия эрозионных и аккумулятивных процессов на окружающую человека среду (Mitasova et al., 2013).

Поэтому для определения вышеперечисленных факторов необходимы расчеты количественных параметров рельефа, которые будут служить основой для оценки динамики эрозионных процессов и трансформации ландшафтов.

Все элементы и формы рельефа по своей природной направленности можно разделить на три основные группы: зоны сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) осадочного материала. Воздействие антропогенного загрязнения на каждую из этих зон не одинаково. Согласно (Руш, 2006), наименьшее накопление

загрязняющих веществ происходит в верхних частях возвышенностей (зоны сноса), более существенное – на склонах, в надпойменных террасах и поймах рек (зоны транзита), и наибольшее – в понижениях и замкнутых формах, например, котловинах (зоны накопления).

Для оценки вероятности проявления эрозионных процессов на территории Архангельской области были выбраны такие геоморфометрические параметры, как угол наклона, LS фактор (индекс потенциала плоскостной эрозии), индекс расчлененности рельефа. В силу того, что ЦМР Архангельской области имеет большую плотность ячеек (344650349 при разрешении 30×30 м), значения рассчитываемых на ее основе геоморфометрических параметров имеют прерывистые сильно «раздробленные» контуры, не позволяющие судить о характере протекания того или иного процесса (Полякова и др., 2019б). Поэтому нужно иметь набор ЦМР различной детализации. Эта задача решается путем генерализации (Самсонов, 2011). В рамках исследования процедура генерализации ЦМР и производных от нее монофакторных карт осуществлялась методом глобальной фильтрации, размер окна составил 10×10 км. Далее генерализованные значения подвергались кластерному анализу для выделения зон с однотипными значениями выбранных параметров. В результате кластерного анализа получены контуры, разделяющие область исследования на три части: минимальные (класс 1), средние (класс 2) и максимальные (класс 3) значения каждого из параметров (рис. 3). Находились общие границы контуров для 1, 2 и 3 классов значений. Для этого выполнялась векторизация растровых кластеров в полигоны (модулем *Vectorising Grid Classes*), затем вычислялись пересечения полигонов (модулем *Intersect* по алгоритму (Vatti, 1992)) в ПО SAGA GIS (рис. 4).

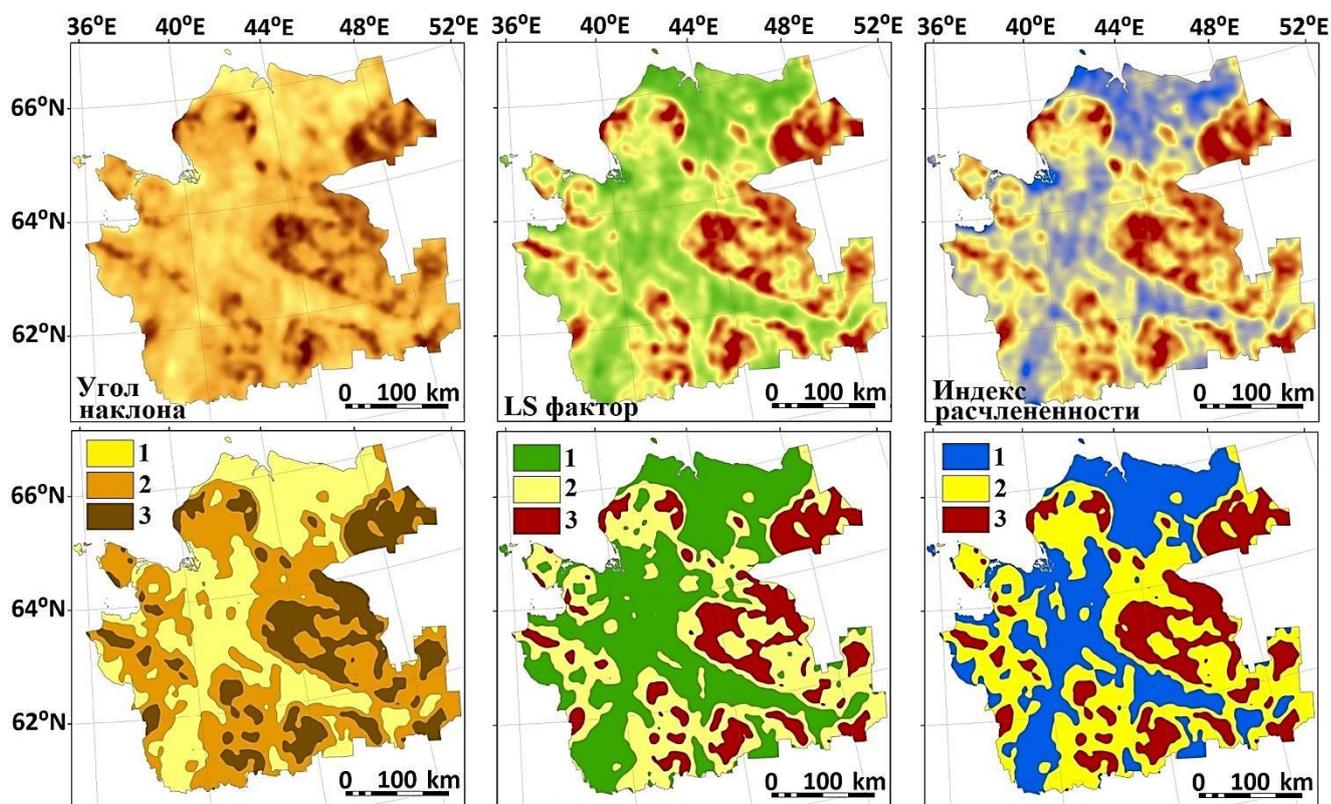


Рис. 3. Значения параметров, рассчитанных на цифровой модели после генерализации (сверху) и кластеризации с разбиением на 3 класса (снизу): 1 – минимальные, 2 – средние, 3 – максимальные значения, по (Полякова и др., 2019б)

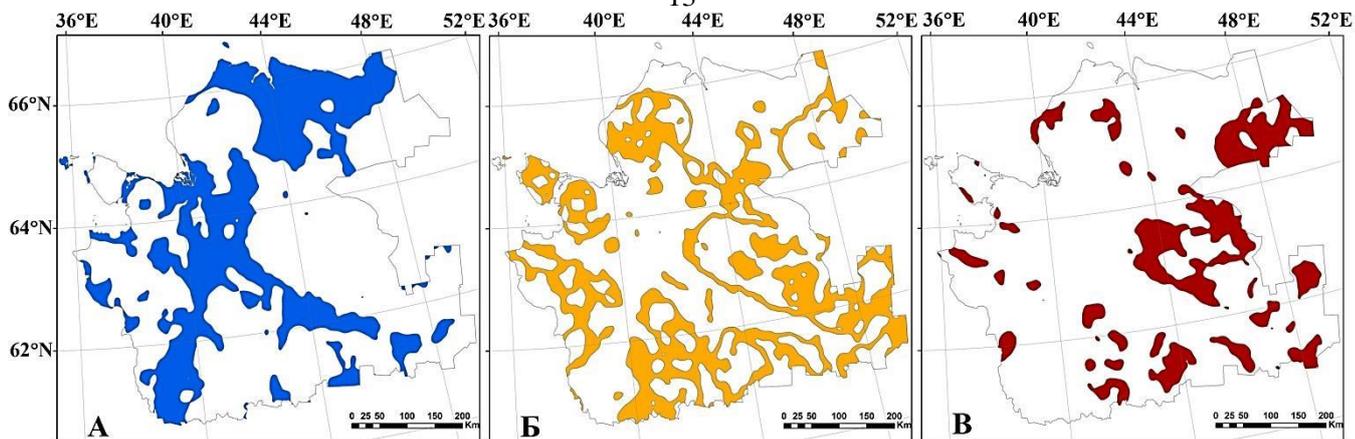


Рис. 4. Объединенные полигоны классов минимальных (А), средних (Б) и максимальных (В) значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности

На основе объединенных полигонов максимальных, средних и минимальных значений параметров получена карта с выделением зон сноса (участков, предрасположенных к развитию эрозионных процессов), транзита и накопления (участков, предрасположенных к развитию аккумулятивных процессов) материала соответственно (рис. 5). Помимо этого выделяются «неопределенные зоны», значения параметров внутри которых при объединении не попали ни в один из полигонов. Их можно рассматривать как некие переходные области между зонами сноса и транзита, а также транзита и аккумуляции.

Далее зона накопления (аккумуляции) делилась на две части по степени увлажнения. Для этого сначала были посчитаны 5 кластеров значений индекса влажности. Выбраны два максимальных класса (класс 4 и 5). Проведены процедуры векторизации и пересечения полигонов классов 4 и 5 индекса влажности с объединенным полигоном минимальных значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа. В результате были выделены две основных области: предрасположенные к подтоплению территории во время паводков и предрасположенные к заболачиванию территории (рис. 5). Площадные характеристики каждой зоны приведены в таблице 1.

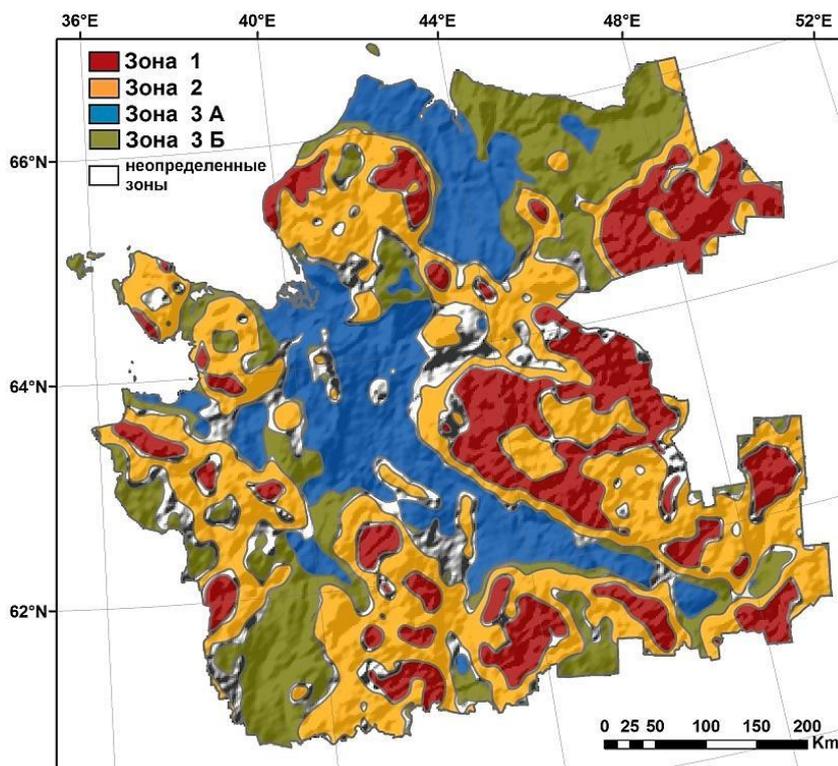


Рис. 5. Карта вероятности проявления потенциально опасных процессов на территории Архангельской области:  
 зона 1 – снос, зона 2 – транзит,  
 зона 3 – аккумуляция:  
 3А – территории, склонные к подтоплению во время паводков;  
 3Б – территории, предрасположенные к заболачиванию

Таблица 1. Площадная характеристика зон с различной вероятностью проявления экзогенных процессов на территории Архангельской области

Зоны	Площадь	
	км <sup>2</sup>	%
Зона 1 – наибольшая вероятность развития эрозионных процессов (зона сноса)	106966	18,21
Зона 2 – возможное развитие эрозионных процессов (зона транзита)	194606	33,13
Зона 3 – потенциальное развитие аккумулятивных процессов (зона накопления)	205002	34,90
- Зона 3А – подтопление	- 101209	- 17,23
- Зона 3Б – заболачивание	- 103793	- 17,67
Неопределенные зоны	80826	13,76
Общая площадь	587400	100

Зоны потенциального подтопления и заболачивания в пространственном отношении хорошо согласуются с картой плотности болот Архангельской области, представленной в работе (Губайдуллин, 2002). Здесь наглядно проявляется соответствие подзон максимальной увлажненности наибольшей плотности болот. Также отмечается согласованность с картой прямой солнечной инсоляции, рассчитанной по ЦМР, где наименее прогретым участкам территории соответствуют максимально увлажненные области (Полякова и др., 2019б).

Таким образом, на основе объединения кластеров максимальных значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа выделены участки с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала и составляющие порядка 18 % исследуемой территории. На основе объединения кластеров средних значений тех же параметров выделены участки с возможным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала и составляющие порядка 33 % территории. На основе объединения кластеров минимальных значений параметров, а также максимальных значений индекса влажности выделены участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующих зонам накопления материала и составляющие порядка 35 % территории исследования (*второе защищаемое положение*).

Кроме того, в главе 3 приведено сопоставление карт источников техногенного воздействия на природную среду Архангельской области, очагов загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами, приведенных в (Губайдуллин, 2002), а также данных проекта «Схема территориального планирования Архангельской области» (Постановление Правительства Архангельской области от 25 декабря 2012 г. № 608-пп «Об утверждении схемы территориального планирования Архангельской области», URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>) с картой зон сноса, транзита и накопления материала. Отмечено, что основные источники техногенного воздействия, а также очаги загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами имеют прямую пространственную корреляцию с природной зоной накопления материала, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории (Полякова, 2019; Полякова и др., 2021б). Помимо этого, приуроченность зон лесопромышленного воздействия (лесозаготовка и транспортировка древесины) к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала, также вызывает большие опасения за состояние окружающей среды, поскольку влечет за собой нарушение целостности почвенно-растительного покрова, и, как следствие, активизацию склоновых процессов, развитие

оползней, оврагов и пр. (Полякова и др., 2021б). Следовательно, установленные на основе геоморфометрического анализа ЦМР Архангельской области природные предрасположенности рельефа к развитию эрозионных и аккумулятивных процессов необходимо учитывать при планировании и хозяйственном освоении территории, строительстве дорог, развитии инфраструктуры, разработке месторождений, вырубке лесов и проведении лесопромышленных мероприятий, а также любой другой антропогенной деятельности.

В **четвертой главе** дана геоэкологическая оценка вероятности активизации карстовых процессов на территории Севера Русской плиты на основе цифрового моделирования рельефа.

Развитие карста на территории Европейского Севера России определяется максимально благоприятными условиями: широким распространением карстующихся пород, выходящих на поверхность или покрытых чехлом четвертичных осадков, тектонической неоднородностью, нетипичной для платформенных условий, циркуляцией пресных агрессивных вод. Сочетание геологических условий и особенностей естественноисторического развития территории привело к образованию уникального карстового комплекса, отличающегося максимальной плотностью подземных и поверхностных форм и разнообразием карстовых гидрологических явлений. Развитие карстового процесса в современных условиях происходит, преимущественно, в пределах локальных зон крупных эрозионных врезов и блоковых тектонических поднятий (Шаврина и др., 2007).

Растворимыми породами на территории Архангельской области являются: известняки и доломиты каменноугольного и пермского возраста, гипсы и ангидриты пермского возраста. Они образуют широкую полосу карстующихся пород, пересекающую область от побережья Белого моря до южной границы. Протяженность данной полосы около 600 км, а ширина составляет 100-200 км. Суммарная площадь карстующихся пород 100,1 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 32,4 % от материковой площади Архангельской области. Сульфатный карст занимает на территории Архангельской области значительно меньшие площади, чем карбонатный, но проявляется более динамично, разнообразно и сосредоточенно (Шаврина и др., 2007; Шаврина, 2018).

Часто цифровые модели рельефа в их необработанном виде содержат ошибки, ложные значения, артефакты. Ошибки ЦМР подразделяются на «приемники» (понижения, «ямы», отрицательные выбросы) и пики (возвышенности, положительные выбросы). Приемник – это ячейка или группа ячеек, окруженная большими значениями высоты, он также называется «локальное понижение» или «впадина». Это касается внутреннего дренажа (Mark, 1984). Впадиной называют локальный минимум, не имеющий стока вниз по склону ни к одной из смежных ячеек ЦМР.

Впадина может состоять из одной или из группы смежных ячеек с одинаковым значением высоты, которое меньше значения окружающих ячеек. В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и артефакты. Ложные впадины – это недостоверные значения ЦМР, их наличие обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты (Wang, Liu, 2006). Гидрологическая коррекция, т.е. устранение ложных впадин, является важной и обязательной процедурой для проведения дальнейшего гидрологического анализа на основе ЦМР (Полякова и др., 2021а).

Для проведения исследования необходимо сформировать понятие о топологии впадин. Не все впадины являются ошибочными в ЦМР. Некоторые из них могут иметь естественное происхождение, особенно в карстовых областях, к которым относится

Архангельская область. В работе (Lindsay, 2016) приведена следующая схема топологии впадин на ЦМР (рис. 6).

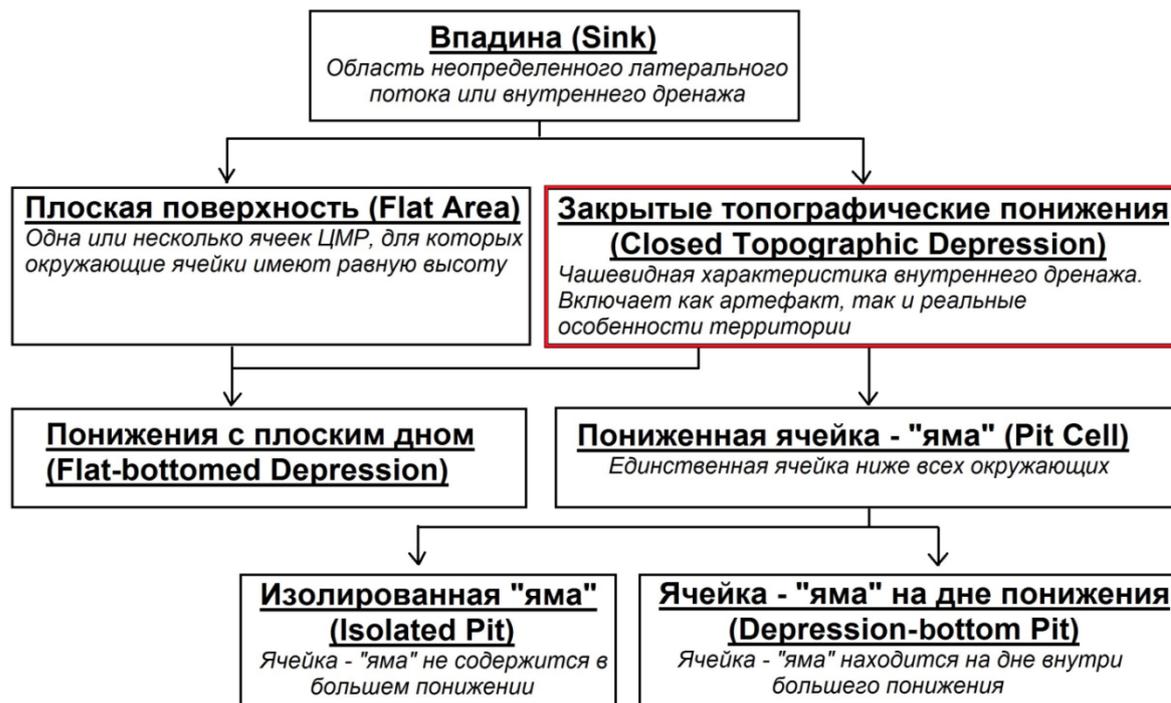


Рис. 6. Топология впадин на ЦМР, по (Lindsay, 2016, перевод авторский)

Автор (Lindsay, 2016) отмечает, что в категории «закрытые топографические понижения» следует выделять естественные элементы рельефа. В работах ряда других авторов (Lindsay, Creed, 2005b; Pardo-Iguzquiza et al., 2016; Hofierka et al., 2018; Zumpano et al., 2019) также показана реальность большинства впадин (т.е. их соответствие естественным понижениям в рельефе, а не ошибочным значениям в ЦМР) для равнинных территорий. По сути, топографическая поверхность воронок – это поверхность бессточных впадин. Поэтому вполне корректно использовать методы гидрологической коррекции ЦМР для обнаружения локальных карстовых понижений и воронок (рис. 7).

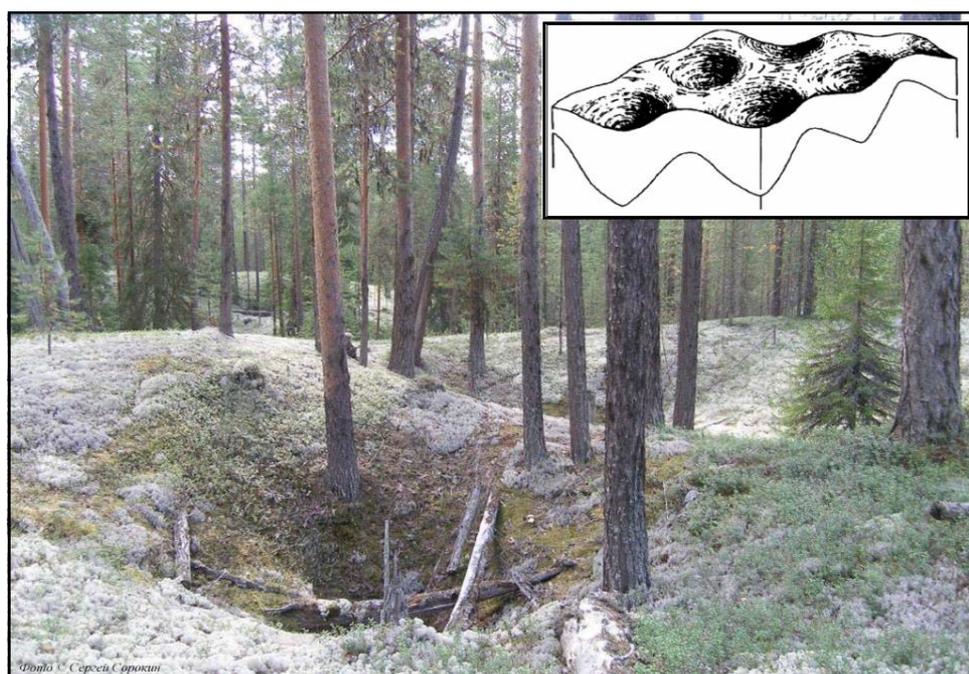


Рис. 7. Топографическая поверхность карстовых воронок в природе (фото Сергея Сорокина) и на схеме, по (Климчук и др., 2009)

Для заполнения впадин в ЦМР Архангельской области был использован метод Wang/Liu (Wang, Liu, 2006), как наиболее быстро выполняющий процесс обработки больших наборов данных, по сравнению с другими методами.

После проведения гидрологической коррекции из растра ЦМР Архангельской области с заполненными впадинами вычитался исходный растр. В результате получен растр маски глубины заполнения впадин. Далее, с использованием модуля SAGA GIS *Vectorising Grid Classes*, маска впадин переводится в векторный формат, из нее вычитаются известные крупные водоемы, речные разливы и прочие водные объекты.

Важность процедуры вычитания показана в статье (Mackay, Vand, 1998). Тем самым отсекаются априорно известные водные накопители.

Для полигонов векторной маски впадин были построены центроиды. Центроид – это центральная точка каждого отдельного полигона. Чтобы подсчитать количество точечных объектов, вся исследуемая территория разбивалась на квадраты 10×10 км.

Далее проводилась интерполяция с применением модуля *Resampling* методом *B-spline* в SAGA GIS. В результате получена карта плотности бессточных впадин на единицу площади (рис. 8А). После проведения кластерного анализа значения плотности бессточных впадин разбиты на три класса – минимальных (1), средних (2) и максимальных (3) значений (рис. 8Б).

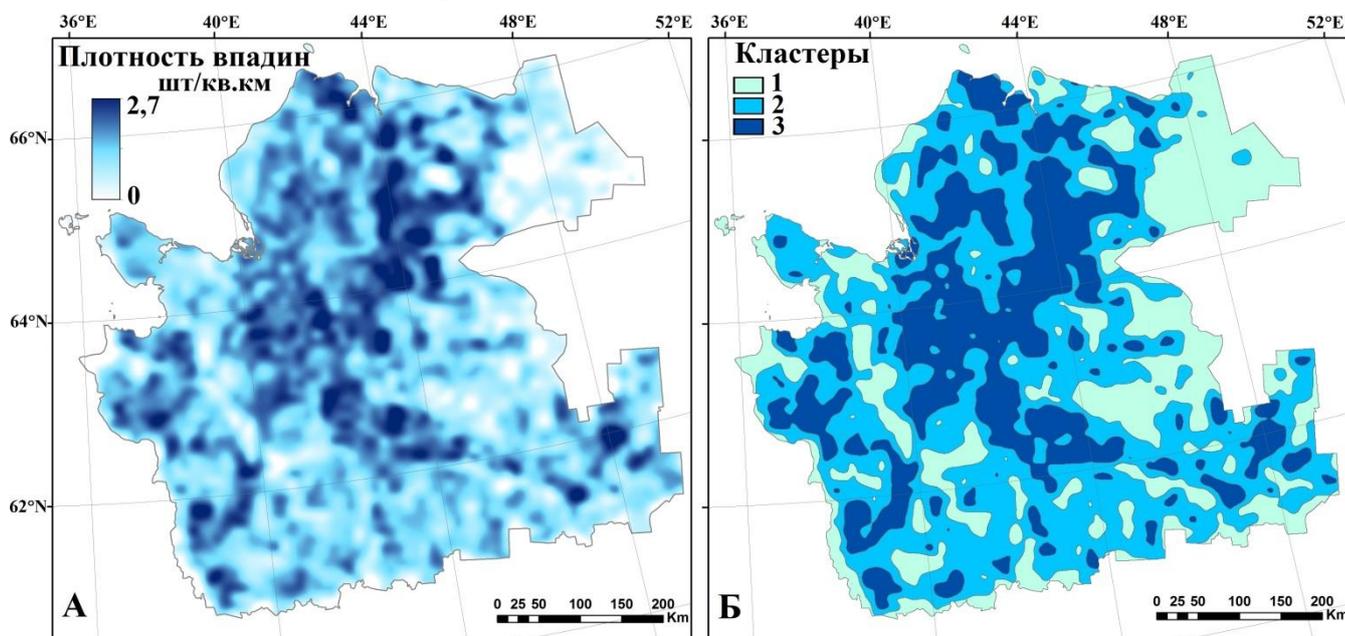


Рис. 8. Плотность бессточных впадин (А) и кластерные значения (Б)

Учитывая пространственное разрешение ЦМР ASTER GDEM v2 (1 угл. сек., ~30 м), выделение отдельных локальных карстовых впадин не представляется возможным. Но оценку предрасположенности районов к развитию карстовых процессов по плотности бессточных впадин можно провести. Повышенная плотность бессточных впадин позволяет предположить активизацию тектонических процессов и, как следствие, повышенную дифференциацию коренных пород. Таким образом, выделяется не конкретная карстовая впадина, а районы с максимальным развитием локальных форм отрицательного рельефа (Полякова и др., 2021а).

Общее количество ячеек в используемой ЦМР – 344650349, из них заполнено – 130705668, что соответствует 38 % территории. Область карстующихся пород на территории области составляет 32,4 %. В целом значения глубин впадин от 1 до 21 м, доминирующей является глубина 1 м (45 %), глубины 1-5 м занимают 81 % от всей выборки.

Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами (во всяком случае, частично), что наиболее отчетливо видно при использовании ячейки 1920×1920 м.

Пространственное совмещение карт плотности бессточных впадин и распространения карстующихся пород проиллюстрировано на рис. 9.

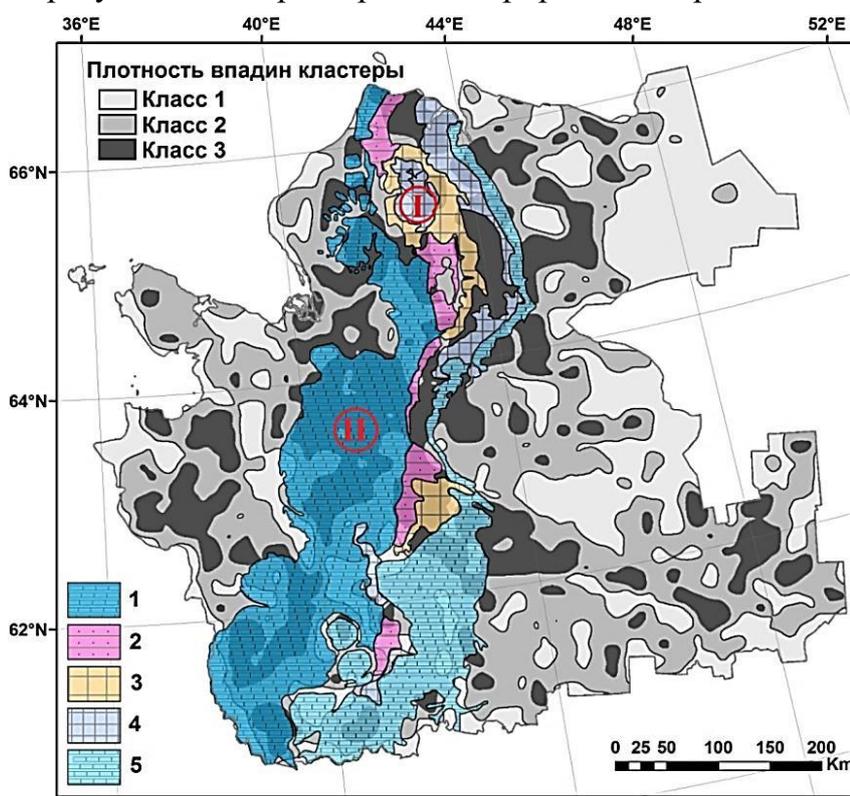


Рис. 9. Кластерные значения плотности бессточных впадин и распространение карстующихся пород на территории Архангельской области:

1 – карбонатные породы среднего и верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми; 2 – сульфатно-карбонатные породы сакмарского яруса нижней перми; 3 – терригенно-сульфатные породы уфимского яруса верхней перми; 4 – карбонатно-терригенные породы нижнеказанского яруса верхней перми; 5 – карбонатные породы верхнеказанского яруса верхней перми

В приуроченности плотности бессточных впадин к карстующимся породам на территории Архангельской области выделяется две зоны.

Зона I – правобережье р. Северной Двины, территория Двинско-Мезенской карстовой провинции. Для этой зоны отмечается большее по сравнению с остальной частью области проявление открытого карста. Развитие карстового процесса здесь происходит, преимущественно, в пределах локальных зон крупных эрозионных врезов и блоковых тектонических поднятий и обеспечивается распространением трещиноватых сульфатных и карбонатных пород, значительной расчлененностью рельефа, небольшой мощностью четвертичных отложений и сильным переувлажнением поверхности. Участки максимального развития открытого карста (долина р. Сотки в Пинежском заповеднике) соответствуют невысокой плотности бессточных впадин, т.к. здесь происходит непосредственное поглощение атмосферных (дождевых и снеговых) осадков обнаженной карстовой поверхностью. Просачиваясь вглубь массивов, атмосферные и поверхностные воды сосредотачиваются в трещинных зонах, формируя подземные водотоки, речные сети и водосборы. Поверхность таких ландшафтов испещрена поглощающими трещинами, здесь практически отсутствуют стоячие воды и болота.

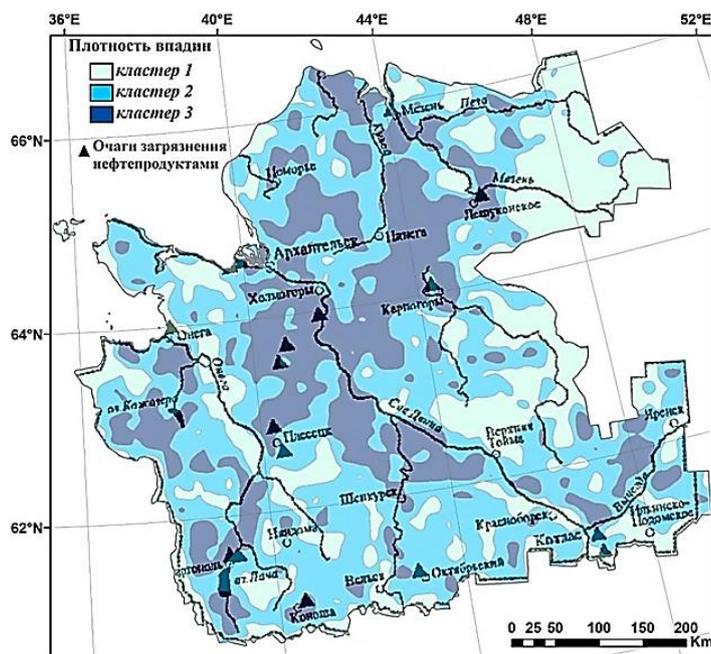
Так, для территорий развития открытого карста резко сокращается площадь болот – от общей плотности болот по области в 35-40 % до 3-5 %. На площадях развития карста отмечается смена темнохвойных еловых лесов светлохвойными сосновым и лиственными (Торсуев, Левин, 1980). Увеличиваются запасы древесины на единицу площади (до 250-300 м<sup>3</sup> в сравнении с 100-150 м<sup>3</sup> на незакарстованных территориях). Кроме того, отмечается проникновение лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), вида, более характерного для Урала и Сибири, по «карстовым коридорам» и «карстовым островам» далеко на запад.

Таким образом, зона I с относительно пониженной плотностью бессточных впадин территориально совпадает с площадями открытого карста («зрелая» стадия). Это можно объяснить процессом объединения локальных изолированных впадин в протяженные вытянутые зоны, формирующиеся в процессе выщелачивания крупных эрозионных врезов. Такие особенности развития карстового процесса находят отражение в повышенных значениях индекса расчлененности рельефа и плотности потоков (Полякова и др., 2021a).

**Зона II** – левобережье р. Северной Двины, территория Онего-Двинской карстовой провинции. Для этой зоны отмечается в большей степени развитие покрытого карста. Карстующиеся породы прикрыты чехлом отложений и подвергаются воздействию, главным образом, подземных вод вмещающего их водоносного горизонта. Это территория, где заболоченные низины чередуются с платообразными или холмисто-волнистыми равнинами, она находится в условиях избыточного увлажнения. Карстующиеся нижнепермские и каменноугольные породы весьма водообильны. Подземные воды залегают на небольшой глубине (2-60 м).

Здесь отмечается максимальная плотность болот, поскольку по территории карстования повсеместно развитие замкнутых депрессий в виде карстовых воронок и понижений в рельефе. Для этой зоны характерно развитие погребенного карста. С точки зрения вероятности активизации карстовых процессов, данная зона представляет большую опасность, по сравнению с первой зоной, поскольку именно здесь располагаются основные объекты техногенного загрязнения.

Кроме того, согласно (Губайдуллин, 2002), установлено локальное загрязнение грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами на ряде объектов хранения, переработки, транспортировки нефти и нефтепродуктов на территории Архангельской области (рис. 10). Пространственное распределение очагов загрязнения прямо коррелирует с



максимальной плотностью бессточных впадин, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории, поскольку карстовые деформации и провалы являются «открытыми» окнами для поступления загрязняющих веществ в неустойчивую к внешнему воздействию геологическую среду.

Рис. 10. Очаги загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами, по (Губайдуллин, 2002)

Таким образом, метод обнаружения бессточных впадин, используемый при гидрологической коррекции цифровой модели рельефа с целью устранения ошибок, может быть применен для выделения зон вероятной активизации карстового процесса, что особенно актуально для лесопокрытых северных территорий с возрастающей антропогенной нагрузкой. Максимальная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста (*третье защищаемое положение*).

В **пятой главе** приведена геоэкологическая оценка состояния подземных вод на основе цифрового моделирования рельефа.

Одним из индикаторов экологического состояния природной среды являются подземные воды, пригодные для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения (Всеволожский, 1981; Боровский и др., 1989; Гаев, 2001; Зверев, 1982, 2006; Крайнов, Закутин, 1994; Крайнов, Швец, 1987; Мироненко, Румынин, 1999; Пиннекер, 1977 и др.).

Использование ресурсов подземных вод относится к одной из жизнеобеспечивающих функций литосферы (Штенгелов, Гриневский, 1999). С этих позиций экологическая значимость пресных подземных вод особых пояснений не требует. Основной задачей устойчивого природопользования в этой сфере является рациональное использование гидроресурсов и снижение их загрязнения выбросами, сбросами и отходами.

В пределах рассматриваемого региона подземные воды формируются в верхней гидродинамической зоне свободного водообмена в условиях интенсивной циркуляции и дренажа, имеют тесную взаимосвязь с атмосферными осадками и поверхностными водами. Защищенность подземных вод от загрязнения определяется (Гольдберг, 1987) перекрытостью водоносного горизонта отложениями и, прежде всего, слабопроницаемыми, препятствующими проникновению в него загрязняющих веществ с поверхности земли. Она зависит от естественных (физико-географических, геологических, биологических и физических) и искусственных (антропогенных) факторов.

По глубине здесь выделено четыре различных в гидродинамическом и гидрохимическом отношении зоны подземных вод: I – активного, II – сравнительно активного, III – затрудненного, IV – весьма затрудненного водообмена.

Величина инфильтрации зимних твердых осадков зависит от времени оттаивания почвы, рельефа местности, характера растительности, водопроницаемости пород и т.п. При весеннем снеготаянии на ровном плато, например, условия для инфильтрации будут более благоприятными, чем на крутых склонах. Инфильтрация оказывается также более интенсивной на участках, покрытых растительностью, т.к. растительность замедляет скорость таяния снега и уменьшает поверхностный сток.

Жидкие атмосферные осадки имеют минерализацию, которая изменяется от 3-4 до 50-60, реже 100 мг/л, т. е. они принадлежат к ультрапресным водам.

Среднегодовой состав атмосферных осадков на территории Севера Русской плиты следующий (Малов, 2003):

$$M 0,008 \frac{Cl_{36} SO_4 29 HCO_3 28 NO_3 7}{Na_{33} Ca_{30} Mg_{20} NH_4 10 K 7}$$

Максимальное воздействие атмосферных осадков на горные породы проявляется там, где мощность перекрывающих четвертичных отложений минимальна, а расчлененность рельефа максимальна.

Показатель расчлененности рельефа косвенным образом определяет химический состав подземных вод. Чем выше неоднородность (расчлененность) рельефа, меньше толщина перекрывающих коренные породы четвертичных отложений, тем большее количество пресных атмосферных вод достигнет водоносных толщ и путем растворения и выщелачивания пород сформирует определенный химический состав подземных вод (Джамалов и др., 1996). В то же время, сравнительно невысокая расчлененность рельефа обуславливает и невысокую интенсивность водообмена и как следствие – более высокую минерализацию подземных вод (Зверев, 2011).

Наибольшей расчлененностью характеризуются возвышенности – Беломорско-Кулойское плато, Коношско-Няндомская возвышенность, Устьянское плато и возвышенность Двинско-Пинежского междуречья.

В работе рассмотрена взаимосвязь химического состава подземных вод и индекса расчлененности рельефа на примере Юго-Восточного Беломорья (ЮВБ), поскольку на данной территории выделяются все области развития подземных вод, характерные для Севера Русской плиты в целом.

Согласно (Малов, 2003) в верхней части гидрогеологического разреза ЮВБ мощностью 100-250 м выделяется пять основных областей развития подземных вод различного качества: 1) пресные кондиционные; 2) пресные некондиционные; 3) солоноватые; 4) соленые; 5) смешанные (номера на рис. 11).

В данном исследовании проведено пространственное сопоставление областей развития подземных вод различного качества с кластерными значениями индекса расчлененности рельефа (классы: 1 – минимальных, 2 – средних, 3 – максимальных значений), отображенное на рис. 11.

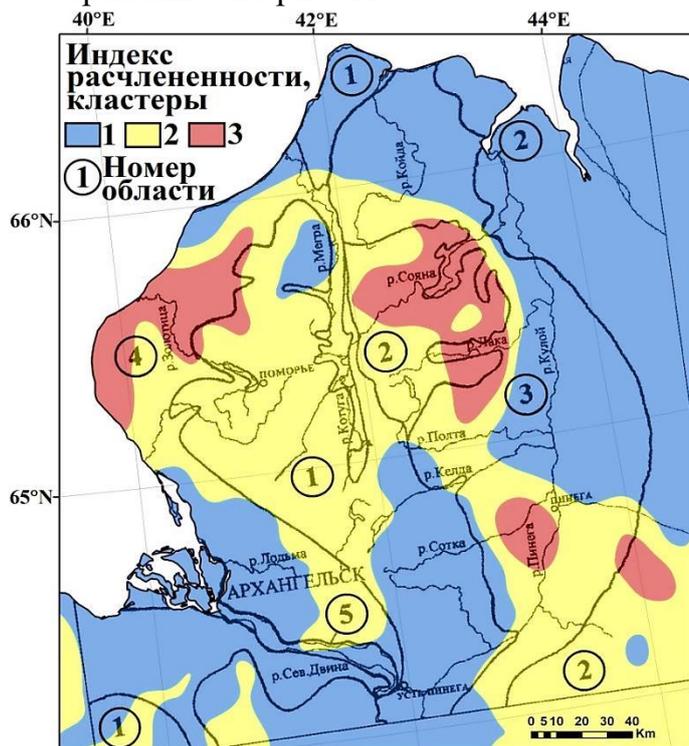


Рис. 11. Схема сопоставления областей развития подземных вод различного качества с кластерными значениями индекса расчлененности рельефа, по (Полякова, 2020)

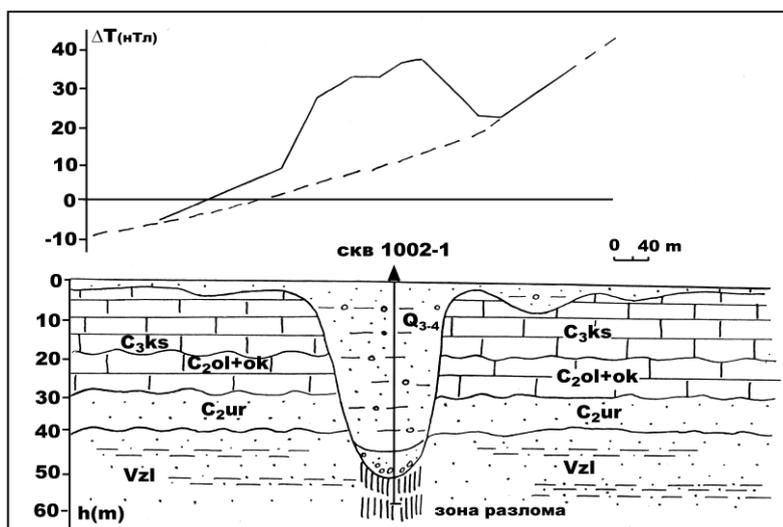
Область развития пресных кондиционных вод (1) включает в себя водоносные комплексы песчаников и алевролитов падуновской свиты венда и урзугской свиты среднего карбона, приуроченные к возвышенным частям территории в основном с абсолютными отметками выше 60-140 м, а также карбонатных пород среднего-верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми, представленных известняками и доломитами с редкими прослоями гипсов.

Большая мощность зоны пресных вод – до 200 м, причем она опускается на 100 м ниже уровня моря, – объясняется широким развитием в пределах данной площади переуглубленных до 100-250 м палеодолин верхнеплиоценового возраста, включающих в себя почти полный разрез плейстоцена с фрагментами неогеновых осадков в основании. Эти сравнительно узкие и глубокие палеодолины осуществляли интенсивное дренирование и опреснение водоносных толщ с вымыванием растворимых соединений на протяжении 1-2 млн. лет.

В четвертичное время на составе подземных вод этой площади практически не отразилось воздействие морских трансгрессий. Для нее характерен маломощный в основном до 10, реже до 20-40 м чехол четвертичных отложений преимущественно песчано-супесчаного состава, значительная расчлененность рельефа, что способствует повышенной инфильтрации атмосферных осадков. Однако, повышение базиса эрозии, произошедшее за четвертичный период и вызвавшее заполнение палеодолин ледниковыми

и морскими отложениями, способствовало поднятию границы минерализованных вод вверх по разрезу, в основном, под современными речными руслами.

Современная активизация разломов, закарстованность территории способствует формированию эффективной зоны взаимосвязи подземных вод с поверхностными условиями. Так, в зоне разлома происходит процесс разубоживания минерализованных вод пресными, что отображается на петромагнитной модели (рис. 12) и является свидетельством современных геохимических процессов, а также подтверждается результатами георадиолокационных наблюдений с использованием георадара ГРОТ-12 по



одному из профилей на геофизическом опытно-методическом полигоне «Белая-2» (Волкомирская, 2009).

Рис. 12. Петромагнитная модель палеодолины, по (Кутинов, Чистова, 2004)

На площади развития пресных подземных вод могут быть размещены водозаборы для централизованного водоснабжения таких крупных городов, как Архангельск, Северодвинск, Новодвинск. Наиболее подходящим местом для их сооружения являются долина верхнего течения р. Пачуги и оз. Пачозеро, расположенные в 40-80 км северо-восточнее Архангельска. Здесь находится Пачугское месторождение пресных подземных вод с прогнозными запасами порядка 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут (Малов, 2004).

Область развития пресных некондиционных вод (2) связана с водоносными комплексами песчаников и алевролитов турьинской свиты сакмарского яруса нижней перми, песчаников и алевролитов уфимского яруса верхней перми и карбонатных пород казанского яруса верхней перми. Несмотря на сходство коллекторских свойств и состава водовмещающих пород, а также основных гидродинамических условий водоносных комплексов эта площадь выделена в качестве области пресных некондиционных вод в связи с наличием в разрезе водоносной толщи уфимских отложений верхней перми целестина, обуславливающего присутствие в подземных водах повышенных концентраций стронция.

Минимальная мощность (вплоть до полного отсутствия) перекрывающих четвертичных отложений обнажает водовмещающий комплекс карбонатных пород казанского яруса верхней перми на поверхности. Водопроницаемость пород высокая (1050 м<sup>2</sup>/сут). В то же время индекс расчлененности рельефа низкий. Однако эта территория характеризуется как зона аккумуляции материала. В работе (Флоринский, 2010, с. 208) отмечается, что «накапливаемые в зонах относительной аккумуляции вещества могут закрепляться в почве и грунтах, вновь участвовать в поверхностном массопереносе в период весеннего снеготаяния и вовлекаться в процесс нисходящей миграции по трещинам горных пород. При нисходящей миграции солей и поллютантов возможна минерализация и загрязнение водоносных горизонтов». Возможность накопления материала подтверждается также выделением по ЦМР бессточных впадин, на этой территории плотность впадин максимальная (рис. 8).

Таким образом, сезонность промывания казанских водовмещающих пород способствует, с одной стороны, максимальному вымыванию стронция из пород в пресные подземные воды, с другой, – его концентрации в них вследствие малого разбавления атмосферными осадками. В связи с этим, в зонах относительной аккумуляции целесообразно проводить гидрогеологический мониторинг и защитные мероприятия.

Область развития солоноватых вод (3) приурочена к областям распространения гипсов и ангидритов с прослоями доломитов, песчаников и алевролитов соткинской свиты и карбонатных пород кулогорской и полтинской свит сакмарского яруса нижней перми, а также огипсованных песчаников и алевролитов с прослоями глин, мергелей, доломитов и известняков уфимского яруса верхней перми. Область солоноватых вод приурочена к пониженным частям территории с абсолютными отметками 60-100 м, тяготеющим к долинам р. Кулой и нижних течений его левых притоков. Мощность чехла перекрывающих четвертичных отложений в пределах площади солоноватых вод минимальна, как правило, она не превышает 10-15 м, что способствует активному развитию на этой территории современных экзогенных процессов, прежде всего, карстовых.

Агрессивное воздействие атмосферных осадков в этой зоне является максимальным. За счет сильной расчлененности и высокой проводимости пород ( $2500 \text{ м}^3/\text{сутки}$ ) проникающие атмосферные осадки обеспечивают растворение значительных включений гипса и ангидрита в карбонатных породах, что способствует смене гидрокарбонатного магниево-кальциевого химического состава подземных вод на сульфатно-кальциевый с минерализацией 2-2,5 г/л.

Для площади развития соленых вод (4) характерна повышенная мощность чехла кайнозойских образований, особенно в зонах развития переуглубленных палеодолин. В разрезах кайнозойских образований преобладают глины и суглинки морского и ледникового происхождения, они играют экранирующую роль для водоносных комплексов дочетвертичных пород, затрудняя их питание атмосферными осадками и опреснение. Кроме того, морские глины содержат практически не опресненные поровые воды с минерализацией до 35 г/л, что выше таковой у соленых вод в нижезалегающих водоносных комплексах (порядка 10-27 г/л). Это обуславливает дополнительный фактор формирования соленых вод – поступление их в водоносные комплексы из толщи глин микулинского межледниковья (Малов, 2003).

Таким образом, несмотря на высокие значения индекса расчлененности рельефа, водоносные комплексы венда, перекрытые с поверхности мощным слоем четвертичных образований, а также имеющие водоупор в виде микулинских глин, оказываются защищенными от растворяющей и опресняющей деятельности атмосферных осадков.

Смешанные воды (5) характерны для водоносных комплексов четвертичных отложений речных долин. Водоносный комплекс четвертичных отложений долины р. Северной Двины приурочен к толще песчано-глинистых отложений мощностью до 40-50 м. Ширина долины 2-7 км, она прорезана в микулинских и валдайских глинах и суглинках. Борта долины возвышаются над поверхностью песчаной толщи на 20-40 м; поверхность песчаной толщи превышает урез воды в реке на 3-10 м, образуя высокую пойму. Верхняя часть разреза песчано-глинистой толщи в долине р. Северной Двины представлена 3-8-метровым слоем суглинков, глин и супесей, что затрудняет инфильтрационное питание водоносного комплекса. При слое атмосферных осадков 500 мм в год на инфильтрацию уходит порядка 20 % (Малов, 2003).

В водоносном комплексе речной долины присутствуют как пресные, так и соленые воды. Однако их смешению препятствует максимальная толщина перекрывающих отложений и низкая расчлененность рельефа, что также защищает соленые воды от деятельности атмосферных осадков; а также глинистый микулинский водоупор.

Таким образом, на равнинных территориях индекс расчлененности рельефа отражает химический состав подземных вод. Высокая расчлененность рельефа, малая толща перекрывающих коренные породы четвертичных отложений, отсутствие водоупора способствуют опреснению подземных вод за счет проникновения ультрапресных атмосферных осадков. Низкая расчлененность рельефа обуславливает невысокую интенсивность водообмена и, как следствие, – более высокую минерализацию подземных вод (*четвертое защищаемое положение*).

Также в главе представлено сопоставление карты защищенности подземных вод с кластерными значениями плотности бессточных впадин, выделенных по ЦМР (рис. 8), результат отображен на рис. 13.

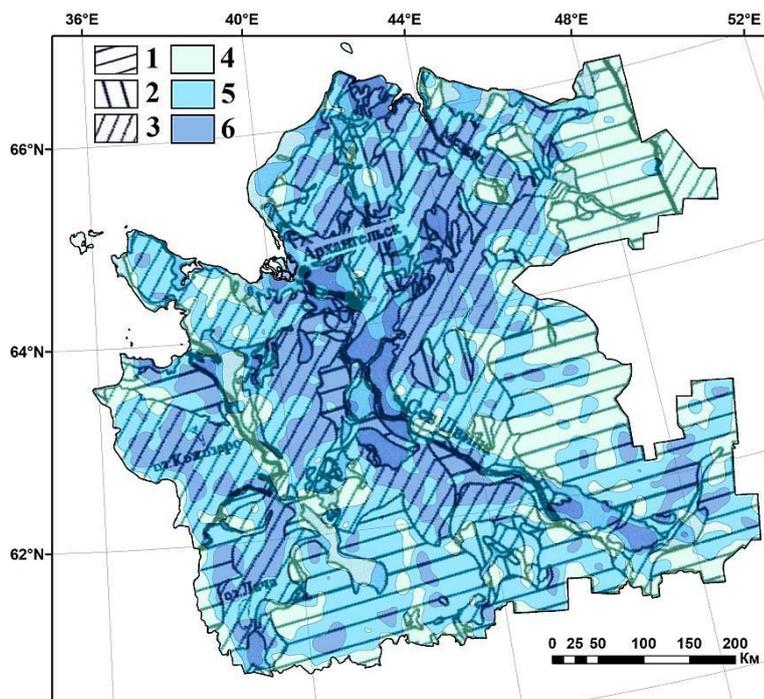


Рис. 13. Защищенность подземных вод от загрязнения, по (Губайдуллин, 2002) и кластерные значения плотности бессточных впадин:

1-3 – защищенность водоносных комплексов: 1 – надежно защищенные, 2 – условно защищенные, 3 – незащищенные; 4-6 – кластерные значения плотности впадин: 4 – минимальные, 5 – средние, 6 – максимальные

Отмечено, что территории с незащищенными водоносными комплексами пространственно совпадают с максимальными значениями плотности бессточных впадин. Это вызывает серьезную экологическую напряженность, поскольку на этих же территориях располагаются основные источники антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области и очаги загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами (рис. 10). Подобные закономерности могут негативно сказываться на качестве подземных вод, вызывая их загрязнение и изменение химического состава.

В шестой главе рассматривается возможность применения цифрового моделирования рельефа в структурно-геологических исследованиях Севера Русской плиты.

Ограниченная обнаженность территории значительно затрудняет систематическое площадное изучение тектонического строения прямыми геологическими методами. Построенные разными авторами мелкомасштабные карты и схемы блоковой тектоники региона, несмотря на существенное сходство, имеют определенные принципиальные различия не только в определении генезиса и истории развития структур, но и в их пространственном размещении. Особенно наглядно это проявляется при сравнении карт, построенных по результатам дешифрирования космофотоматериалов и геоморфологических исследований, и карт интерпретации геопотенциальных полей (Кутинов и др., 2011). К тому же существует мнение, что сформировавшийся рельеф севера Восточно-Европейской платформы достаточно молод и не отражает ее тектонического строения. Главные черты современного рельефа своим происхождением обязаны деятельности четвертичного оледенения нескольких стадий, а также морских трансгрессий в межледниковые периоды. Остатки унаследованных морфоструктурных

элементов дочетвертичного рельефа проявлены только в виде возвышенных участков Ветреного Пояса и Тиманской гряды (Губайдуллин, 2002). Однако принципиально новое положение о том, что Восточно-Европейская платформа как единая структура первого рода является не тектонически пассивной, а достаточно подвижной, особенно в ее окраинных частях, формирует необходимость учета структурно-тектонических факторов при анализе облика современного рельефа.

По наблюдаемому и трансформированному гравитационному и магнитному полям в фундаменте севера Русской плиты прослеживаются протяженные линейные аномалии северо-западного простирания, обусловленные наложенными на архейские образования свекофено-карельскими складчатыми зонами, размещение которых определяют глубинные региональные разломы, вмещающие интрузии ультраосновного состава. Для ранней стадии развития этих структур в позднем архее характерен преобладающий режим растяжения, сформировавший раздвиги и сбросы северо-западного простирания. Вдоль разломов формировались зеленокаменные пояса различного типа (Воронья-Колмозерский, Имандра-Варзугский, Хаутаварский, Ветренопоясной, Гимольский) (Савицкий и др., 1986). Грабеноподобный характер прогибов, мощный мантийный вулканизм, начальные условия растяжения дают возможность предположить о проявление процессов рифтогенеза в условиях консолидированной архейской коры (Геология и геохронология..., 1990; Gaal, Gorbachev, 1987).

В конце позднего архея, в связи со складчатостью (преобладающий режим сжатия), раздвиги и сбросы преобразовались в взбросо-сдвиги и надвиги.

Основная сеть разломов севера Русской плиты была заложена главным образом в позднем архее (2600-2800 млн. лет) в связи с кеноранским диастрофизмом (Салоп, 1982). В домезозойской истории разрывных нарушений отмечаются от четырех до десяти этапов их активизации (Савицкий и др., 1986), протекавших в разное время и в различных геотектонических режимах. Эти разломы являются долгоживущими и, как правило, характеризуются сложным внутренним строением как вкрест, так и вдоль простирания. Они являются границами оформившихся в кеноранскую эпоху геоблоков и входящих в их состав блоков II и III порядка. Современные очертания и особенности внутреннего строения блоков определились в результате их неоднократной перестройки в раннем и, особенно, в позднем протерозое и, частично, палеозое, но в общих чертах они близки к первоначальным.

В целом можно сделать вывод, что для севера Русской плиты характерно развитие в основном двух разновидностей глубинных структур (линейно-блоковые и блоковые структуры III и IV порядков) – в виде желобов и в виде перевернутых конусов и блоков (Березовский и др., 1993). Структуры первого типа характеризуются максимальным погружением фундамента до 4-5 км (прогибы или системы прогибов), валлообразными поднятиями поверхности Мохо с амплитудой 2-18 км и значительным сокращением мощности коры. Для структур второго типа в виде блоков характерна приподнятая поверхность кристаллического фундамента (глубина залегания 0-2 км), погружение границы Мохо до 38-42 км.

Изучение тектонических структур (в первую очередь дизъюнктивных) на территории древних платформ, перекрытых мощным осадочным чехлом, сталкивается с определенными трудностями. Это связано как с природными факторами, так и с пробелами в методических и методологических разработках. Основная проблема заключается в оценке форм и интенсивности проявлений активности тектонических структур, в том числе и их роли в формировании структуры литогенной основы ландшафтов. При этом недостаточно ясен вопрос современной активности структуры и ее проявлений на дневной поверхности, которые могут оказывать влияние на развитие

эрозионных процессов и формирование аккумулятивных форм рельефа (Кутинов, Чистова, 2001).

Самой информативной границей платформенного чехла является поверхность раздела чехла и фундамента (подошва чехла). В ней в той или иной мере запечатлены все тектонические движения, которые происходили на различных этапах развития платформы. Внутреннее строение чехла можно представить по вышележащим структурным поверхностям.

Данные о глубине залегания фундамента получены из материалов отчета Березовского В.З. и др. из фондов Архангельского филиала ФБУ «ТФГИ по СЗФО» (Березовский В.З. и др., 1988). Также «Карта рельефа поверхности фундамента» масштаба 1:1000000 приведена в работе (Литосфера..., 2001, С. 50). Основные структуры фундамента Русской плиты, по (Березовский и др., 1988) приведены на рис. 14.

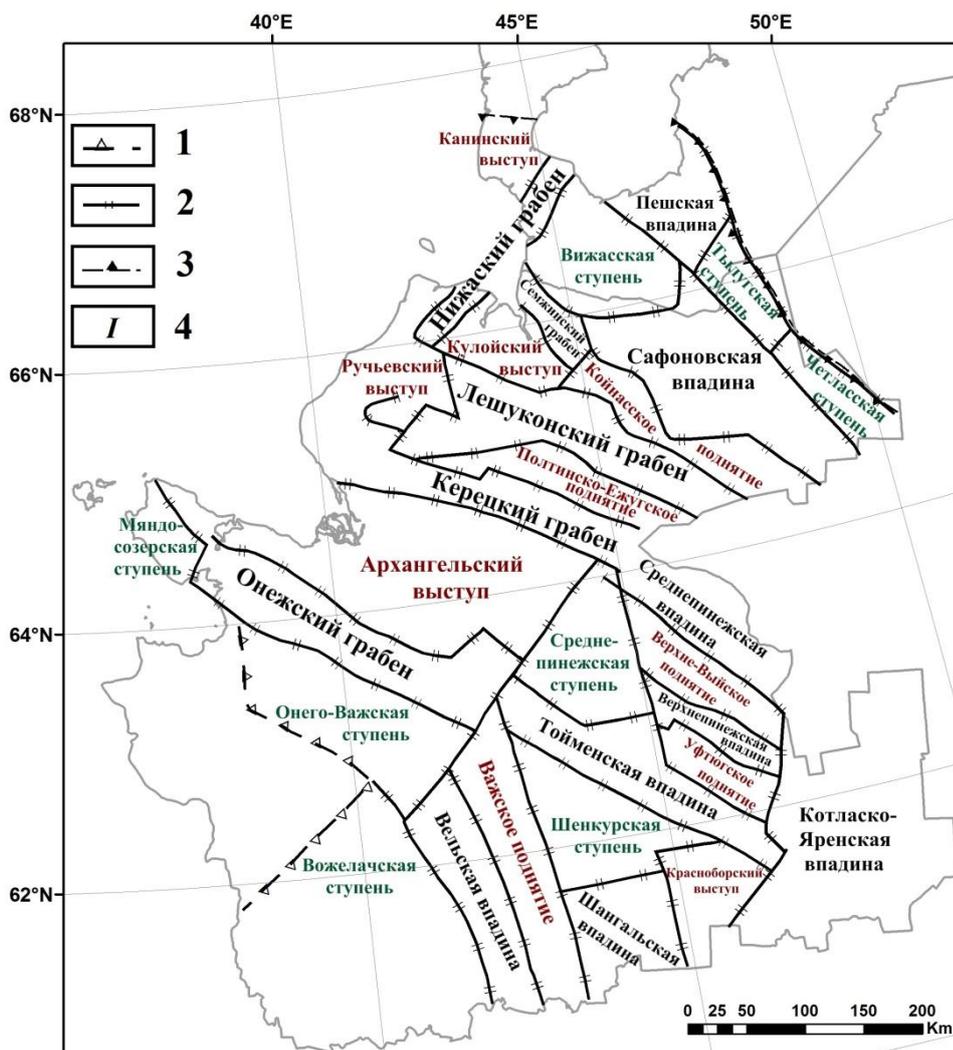


Рис. 14. Основные структуры фундамента Русской плиты, по (Березовский и др., 1988):

Границы: 1 – надпорядковых структур, 2 – структур фундамента, 3 – западная граница Тиманского поднятия; тектоническое районирование: I – Балтийский щит, II – Русская плита, III – Канино-Тиманское поднятие

Процесс получения ЦМР поверхности фундамента состоял из трех этапов: сканирование исходного материала; оцифровка изогипс глубин залегания фундамента в программной среде ESRI ArcGIS; создание цифровой модели глубины залегания в ESRI ArcGIS с применением модуля *Topo to Raster* из линейки инструментов ArcToolBox.

Было проведено сопоставление двух цифровых моделей рельефа – поверхности фундамента и дневной поверхности.

Поскольку на территории области высота рельефа земной поверхности измеряется десятками и сотнями метров, а глубина залегания фундамента – километрами, произвести анализ зависимости величин друг от друга графически представляется затруднительным. Поэтому была применена процедура математического нормирования значений глубин фундамента  $F(x)$  и высот рельефа дневной поверхности  $R(x)$  для каждой ячейки растра в диапазоне от 0 до 1 по следующей формуле:

$$y' = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}},$$

где  $y'$  – нормированное значение в определенной ячейке растра,  $y$  – абсолютное значение высоты (или глубины) в данной ячейке в м (км),  $y_{max}$  – максимальное значение высоты (глубины) для всего растра в м (км),  $y_{min}$  – минимальное значение высоты (глубины) для всего растра в м (км).

Пример нормирования по профилю приведен на рис. 14.

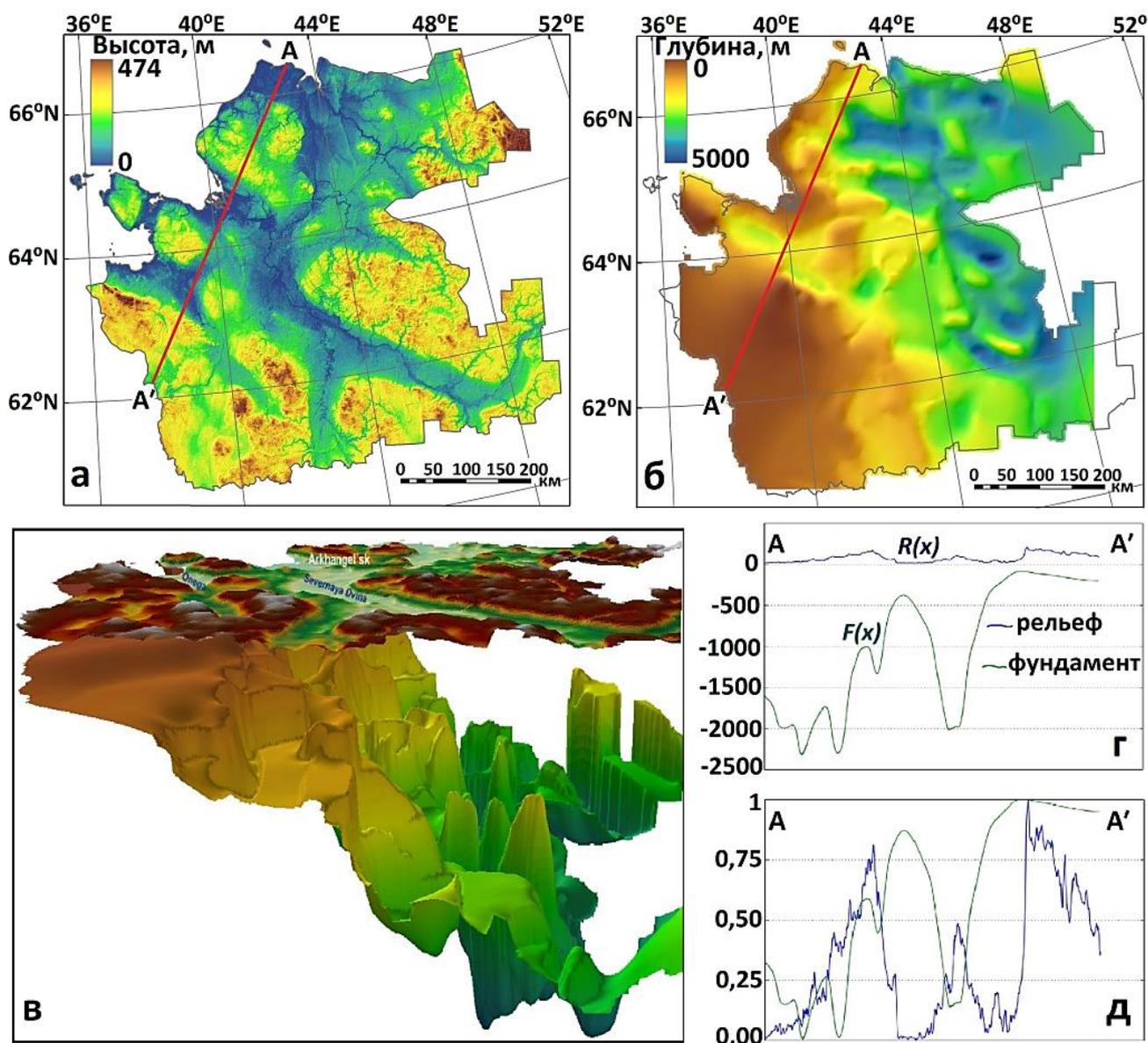


Рис. 14. Пример нормирования значений высот рельефа дневной поверхности и глубин фундамента по профилю А-А', по (Полякова и др., 2019а):

а – цифровая модель рельефа на территорию Архангельской области, б – цифровая модель рельефа поверхности фундамента, в – сопоставление моделей в 3D, г – график значений по профилю А-А', д – график нормированных значений по профилю А-А'

В результате получается матрица нормированных значений глубины залегания фундамента  $MF_n$  и матрица нормированных значений высоты рельефа поверхности  $MR_n$ .

Дальнейший анализ характера отражения структур фундамента в дневном рельефе осуществляется на основе значений *матриц разности* и *матриц суммы*:

$$M^- = MF_n - MR_n$$

$$M^+ = MF_n + MR_n.$$

Значения разностей и сумм нормированных значений описывают определенные формы рельефа фундамента и дневной поверхности (рис. 15). При этом под **прямыми формами** будем понимать те участки области исследования, в которых одновременно с поднятием земной поверхности наблюдается поднятие фундамента или одновременно с опусканием земной поверхности наблюдается опускание фундамента (А, В на рис. 15). Характеризовать эти формы будут значения матрицы  $M^+$ , близкие к 0 или 2. Под **обратными формами** будем понимать те участки, в которых одновременно с поднятием земной поверхности наблюдается опускание фундамента или одновременно с опусканием земной поверхности наблюдается поднятие фундамента (С, D на рис. 15). Характеризовать эти формы будут значения матрицы  $M^-$ , близкие к 1 или -1.

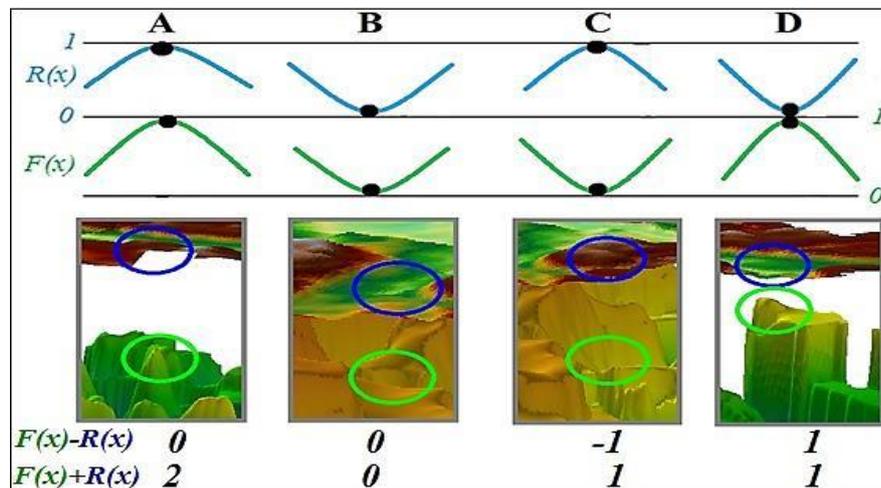


Рис. 15. Разность и сумма нормированных значений функций: А, В – прямые; С, D – обратные формы

Выделение форм наследования структур фундамента в современном рельефе Севера Русской плиты проводилось в два этапа.

На первом этапе стояла задача разделить область исследования на два типа форм – прямые и обратные. Для этого введено понятие *абсолютной разницы нормированных значений* матриц высоты земной поверхности и глубины залегания фундамента:

$$M^{abs} = |MF_n - MR_n|.$$

Имея в виду такое обозначение, можно говорить, что:

- значения матрицы абсолютной разности  $M^{abs}$ , приближающиеся к 0, будут соответствовать **прямым формам**;

- значения матрицы абсолютной разности  $M^{abs}$ , приближающиеся к 1, будут соответствовать **обратным формам**

Таким образом, можно поделить всю территорию исследования на три области, одна из которых занята прямыми формами, вторая – обратными, а третья – переходная зона, где наследования не отмечается. При этом прямым формам соответствуют значения от 0 до 0,45, обратным – от 0,55 до 1, значения от 0,45 до 0,55 характеризуют переходную зону. Прямой характер наследования имеет порядка 61 % территории исследования, обратный – 25 %, районы, где наследования не отмечается, занимают 14 % территории (таблица 2).

Таблица 2. Статистика форм наследования структур фундамента в рельефе

Формы	Площадь территории, км <sup>2</sup> / %	Диапазон высот земной поверхности (от-до/среднее), м	Диапазон глубин залегания фундамента (от-до/среднее), км
Прямые	187901,9 / 60,8	5,56-313,54 / 117,01	0,24-5,05 / 2,86
Обратные	78498,5 / 25,4	0,07-431,34 / 73,15	0-3,42 / 0,7

На втором этапе стояла задача выделения внутренней структуры форм.

Прямые формы по своей внутренней структуре делятся на два класса (по типу **фундамент-рельеф**):

1) **выступ-выступ** – те участки, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности (рис. 15А). Характеризуют эти участки значения матриц суммы, близкие к 2;

2) **впадина-впадина** – участки, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается опускание земной поверхности (рис. 15В). Им соответствуют значения матриц суммы, близкие к 0.

Обратные формы, в свою очередь, так же делятся на два класса.

1) **впадина-выступ** – те участки области исследования, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности (рис. 15С). Характеризуют эти участки значения матриц разницы, близкие к -1;

2) **выступ-впадина** – участки, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается опускание земной поверхности (рис. 15D). Этим участкам соответствуют значения матриц разности, близкие к 1.

Комбинируя значения матриц разницы и суммы таким способом, можно разделить исследуемую территорию по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе (рис. 16).

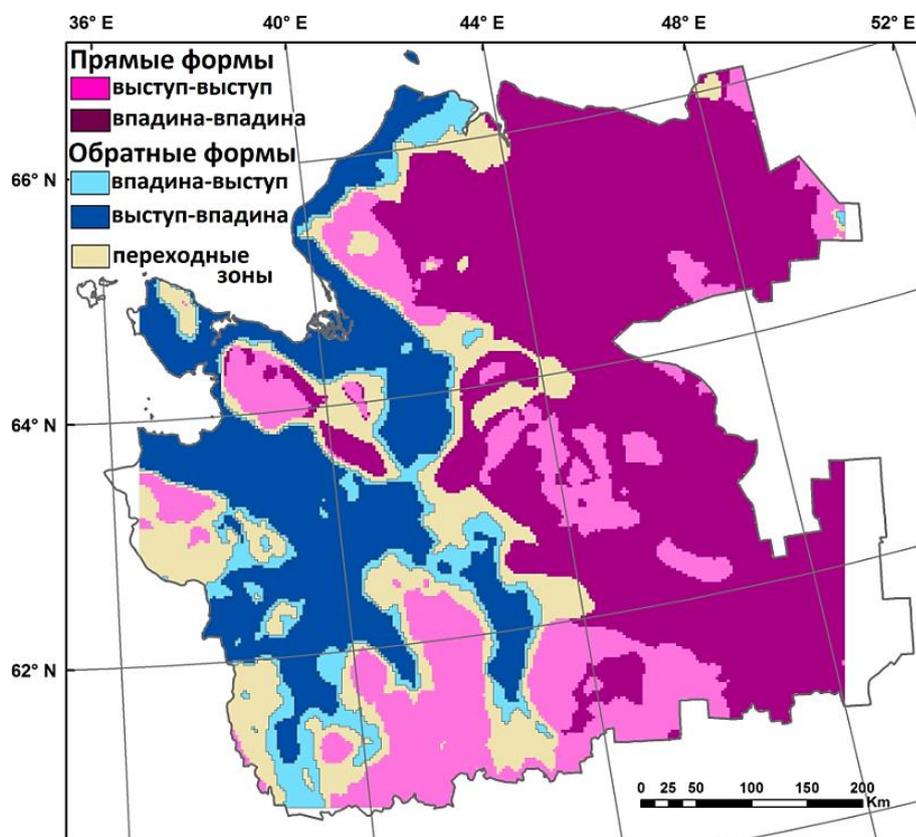


Рис. 16. Районирование территории Архангельской области по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе, по (Полякова и др., 2019а)

Проведенное исследование по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе на территории Архангельской области позволяет сделать вывод о преобладании прямых форм наследования на северо-востоке территории и обратных форм на юго-западе. Такое разделение достаточно хорошо совпадает с простираем и пространственным положением рифтовых систем.

Примененный кластерный анализ с разбиением прямых и обратных форм на 2, 4, 6 и 8 кластеров позволил детализировать формы по протяженности и направлению (рис. 17). Первые классы прямых форм соответствуют внутренней структуре типа «выступ-выступ», последние – типу «впадина-впадина». То же с обратными формами: первые классы соответствуют внутренней структуре типа «впадина-выступ», последние – типу «выступ-впадина».

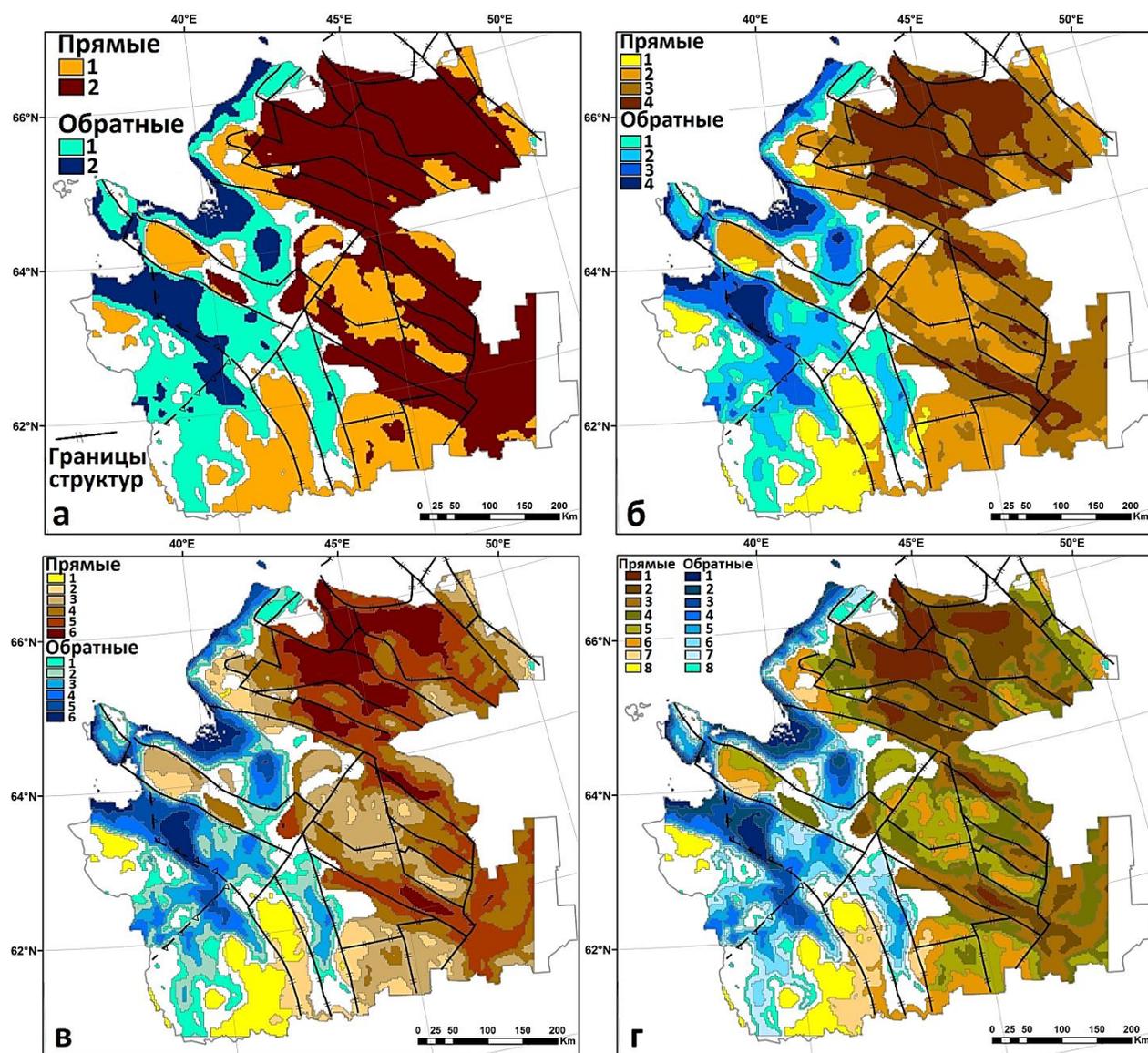


Рис. 17. Сопоставление кластерных значений прямых и обратных форм с основными структурами Русской плиты, по (Полякова и др., 2019а):  
а – 2 класса, б – 4 класса, в – 6 классов, г – 8 классов

Из рис. 17 хорошо видно северо-западное простираем прямых форм отражения фундамента в современном рельефе.

Также в главе было проведено сопоставление материалов по вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным (Рябухина и др., 1997) с ЦМР дневной поверхности и ЦМР фундамента (рис. 18).

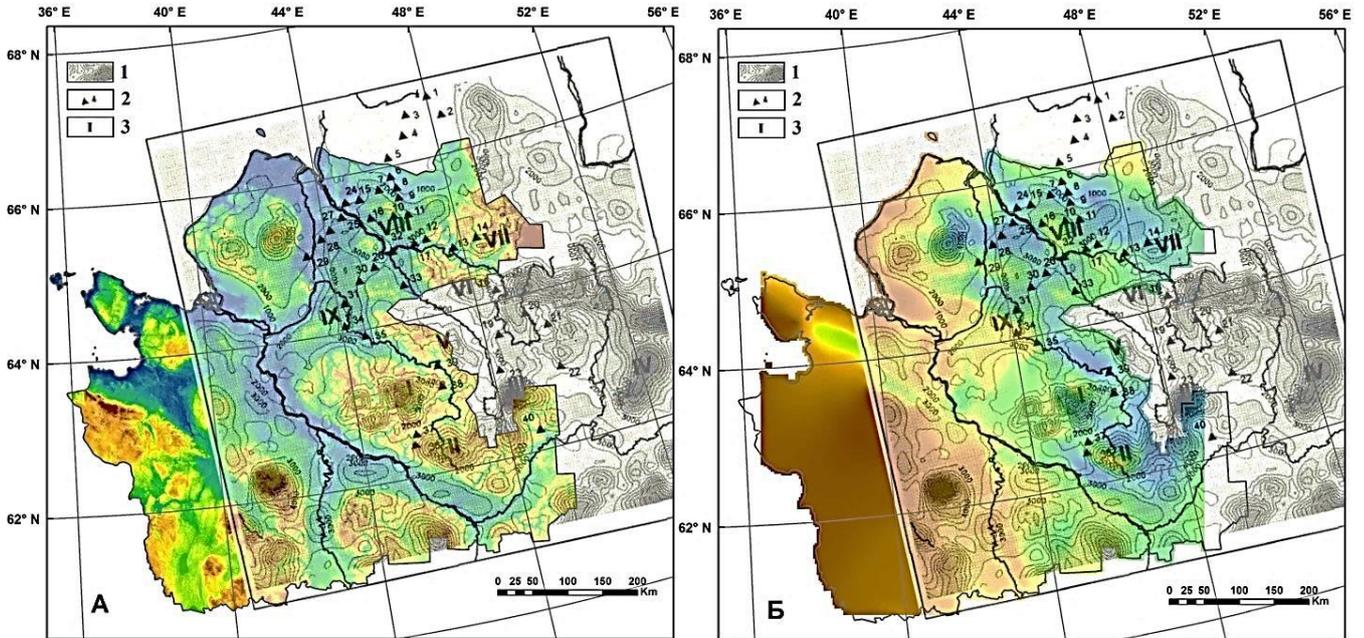


Рис. 18. Сопоставление материалов по вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений, по (Рябухина и др., 1997) с ЦМР поверхности (А) и ЦМР фундамента (Б)  
 1 – изогипсы произведения условных вероятностей встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным; 2 – скважины; 3 – I-IX – наиболее перспективные участки для поиска нефти и газа

При определении условий нефтегазообразования и нефтегазонакопления ведущая роль в общем комплексе факторов отдается тектоническим критериям. Большое место в ряду этих факторов отводится деформациям новейшего тектонического этапа (Тимурзиев, 2006). Сами новейшие деформации зачастую полностью или частично наследуют структурный план более ранних тектонических этапов, причем основной механизм формирования тектонических структур может функционировать достаточно продолжительное время (Дмитриевская и др., 2000).

Кроме того, предварительные результаты расчетов свидетельствуют, что проявления кимберлитового магматизма соответствуют прямым формам отражения структур фундамента в современном рельефе и структурно характеризуются как «выступ-выступ». Это характерно для Зимнебережного кимберлитового района, в пределах которого в настоящее время ведется разработка двух месторождений алмазов – имени М.В. Ломоносова и В.П. Гриба, и разведанных Ненокского и Белозерского кимберлитовых полей.

Таким образом, в первом приближении можно говорить о том, что проявление кимберлитового магматизма и районы вероятных локализаций нефтяных и газовых месторождений приурочены к повышениям на поверхности и соответствуют прямым формам отражения структур фундамента в современном рельефе, более тяготеющим к типу «выступ-выступ» (рис. 19).

Повсеместное покрытие Архангельской области лесным покровом, малое количество глубинных скважин, вскрывающих древние осадочные толщи и обнажающие поверхность фундамента, значительно затрудняют изучение глубинного строения территории. При поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, а также оценке их перспективности, на первое место выходят косвенные признаки и критерии выделения перспективных областей. Одним из таких подходов является выявление структур фундамента на дневной поверхности на основе цифрового моделирования рельефа.

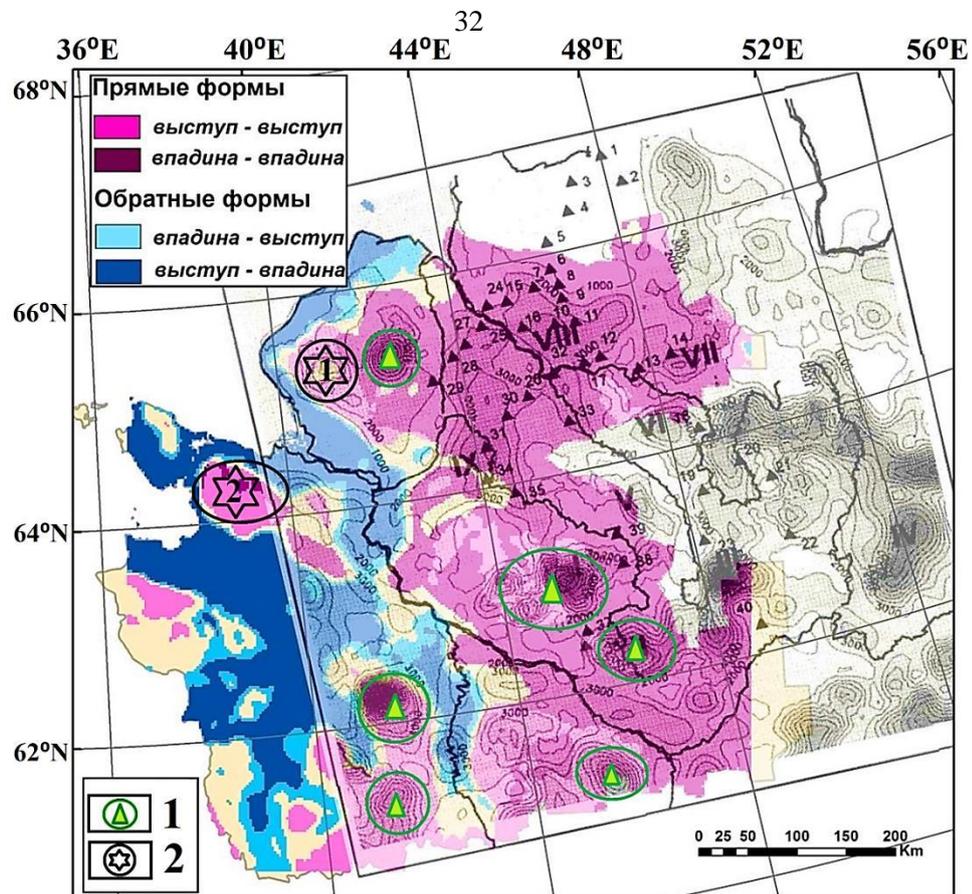


Рис. 19. Сопоставление материалов по вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений, по (Рябухина и др., 1997) и районов проявления кимберлитового магматизма с картой районирования Архангельской области по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе, по (Полякова и др., 2019а):

1 – районы вероятных локализаций нефтяных и газовых месторождений; 2 – районы кимберлитового магматизма: Зимнебережный (номер 1 на карте), Ненокское и Белозёрское (номер 2 на карте) кимберлитовые поля

Подобный методический подход к решению проблемы установления проявления глубинных структур в дневном рельефе проведен автором с соавторами впервые (Кутинов и др., 2016, 2017, 2019; Полякова и др., 2019а). Вопрос этот имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Прямое наследование или отсутствие такового позволяет сделать вывод о возможной активизации разломов при разработке месторождений полезных ископаемых и, как следствие, миграции глубинных флюидов, проникновении загрязняющих веществ по латерали и вертикали и прочих сопутствующих явлений. Приведенные результаты являются предварительными, требуют дальнейшего детального изучения и проработки. Вопрос наследования остается открытым. Тем не менее, данный подход, несомненно, является современным, актуальным. Дальнейшее проведение геоморфометрического анализа цифровой модели фундамента позволит давать более качественную и детальную оценку его структурных элементов.

Таким образом, **цифровое моделирование рельефа позволяет проводить структурно-геологические исследования. На основе сопоставления цифровой модели рельефа фундамента и цифровой модели дневной поверхности выделены формы проявления структур фундамента в современном рельефе Архангельской области. Прямой характер наследования имеет 61 % территории, обратный – 25 %, районы, где наследование не проявляется, соответствуют 14 % территории области (пятое защищаемое положение).**

**В заключении** приводятся основные результаты диссертационного исследования:

1. Выполненный аналитический обзор сложившихся тенденций и современных подходов к проведению геоэкологических исследований в России и за рубежом позволил обозначить геодинамическую функцию геологической среды, связанную с вероятностью проявления природных геологических процессов в свете возрастающей антропогенной нагрузки на территории Севера Русской плиты (в пределах Архангельской области).

2. Показана возможность применения ЦМР в геоэкологических исследованиях. Проведение геоэкологической оценки состояния природной среды средствами цифрового моделирования рельефа должно осуществляться по следующему алгоритму: выбор ЦМР – выбор программного обеспечения – подготовка ЦМР – выбор геоморфометрических параметров – проведение геоморфометрического анализа по выбранным параметрам – составление карт прогнозно-вероятностного моделирования.

3. В результате проведенного анализа для геоэкологической оценки территории Архангельской области выбраны такие геоморфометрические параметры, как угол наклона, LS фактор, индекс расчлененности рельефа и индекс влажности по степени их участия в развитии эрозионных и аккумулятивных процессов. Для выявления локальных участков, предрасположенных к аккумуляции загрязняющих веществ, применялась сумма горизонтальной и вертикальной кривизн (классификация Треха).

4. На основе кластерного анализа вышеперечисленных параметров дана геоэкологическая оценка территории Архангельской области по степени развития природных геологических процессов. Выделены участки с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала и составляющие порядка 18 % исследуемой территории; участки с возможным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала и составляющие порядка 33 % территории; участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующих зонам накопления материала и составляющие порядка 35 % территории исследования. В зоне аккумуляции выделены также территории, склонные к подтоплению во время паводков и предрасположенные к заболачиванию.

5. Проведена геоэкологическая оценка вероятности активизации карстового процесса с применением нового инструмента – подсчета плотности бессточных впадин. Показано, что максимальная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста.

6. Проведена геоэкологическая оценка состояния подземных вод зоны активного водообмена. Показано, что на равнинных территориях индекс расчлененности рельефа отражает химический состав подземных вод. Высокая расчлененность рельефа наряду с малой толщиной перекрывающих четвертичных отложений, отсутствием водоупора способствуют опреснению вод за счет проникновения ультрапресных атмосферных осадков. Низкая расчлененность рельефа обуславливает невысокую интенсивность водообмена и, как следствие, – более высокую минерализацию подземных вод.

7. Показана возможность применения цифрового моделирования рельефа в структурно-геологических исследованиях. На основе сопоставления цифровой модели рельефа фундамента и цифровой модели дневной поверхности выделены формы проявления структур фундамента в современном рельефе Архангельской области. Прямой характер наследования имеет 61 % территории, обратный – 25 %, районы, где наследование не проявляется, соответствуют 14 % территории области.

8. Полученные данные по формам отражения структур фундамента в современном рельефе позволяют сделать вывод о возможной активизации разломов при разработке месторождений полезных ископаемых и, как следствие, миграции глубинных флюидов, проникновении загрязняющих веществ по латерали и вертикали и прочих сопутствующих явлениях.

## Список опубликованных работ по теме диссертации

### Монографии:

1. **Полякова Е.В.** Стронцийсодержащие воды Юго-Восточного Беломорья. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 102 с.
2. Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период / Под ред. К.Г. Боголицына, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 252 с. (**Полякова Е.В.** – разделы 3.4, 4.1, 4.3)
3. **Полякова Е.В.** Стронций в подземных водах Мезенской синеклизы. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 185 с.
4. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., **Полякова Е.В.**, Чистова З.Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). – Пенза: «Социосфера», 2019. – 177 с.
5. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.**, Минеев А.Л. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). – Пенза: «Социосфера», 2020. – 378 с.

### Статьи в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus:

6. **Полякова Е.В.** Стронций в источниках водоснабжения Архангельской области и его влияние на организм человека // Экология человека, 2012. – № 2. – С. 9-14 (*Scopus*)
7. **Elena Polyakova**, Mikhail Gofarov, Yuriy Kutinov, Vladimir Beljaev, Zinaida Chistova, Nikolay Neverov, Vadim Staritsyn, Alexandr Mineev, Sergey Durynin. Erosion processes in karst landscapes of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modelling // Journal of Mountain Science, 2016. – Vol. 13(4). – P. 569-580. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3642-3> (*Web of Science*)
8. Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G., Staritsyn V.V., **Polyakova E.V.**, Mineev A.L. Effects of geo-ecological conditions on larch wood variations in the North European part of Russia (Arkhangelsk region) // Journal of Forest Science, 2017. – Vol. 63(4). – P. 192-197. <https://doi.org/10.17221/102/2015-JFS> (*Scopus*)
9. Минеев А.Л., **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 58-67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67> (*Scopus*)
10. Neverov N., Belyaev V., Chistova Z., Kutinov Y., Staritsyn V., **Polyakova E.**, Mineev A., Tyukavina O. Influence of morphometric parameters of relief on macro- and microstructure of wood *Pinus silvestris* L. in the North of the Russian Plain // Journal of Forest Science, 2019. – Vol. 65. – P. 79-85. <https://doi.org/10.17221/123/2018-JFS> (*Scopus*)
11. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 95-104. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104> (*Scopus*)
12. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Опыт применения цифрового моделирования для выявления наследования структур фундамента в современном рельефе севера Русской плиты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 75-83. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83> (*Scopus*)
13. Ермаков Д.М., Поляков В.Д., **Полякова Е.В.** Разработка нового алгоритма восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга // Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 31-41. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41) (*Scopus*)

14. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 7. С. 117-127. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127) (*Scopus*)

15. **Polyakova E.V.**, Kutinov Yu.G., Mineew A.L., Chistova Z.B. Geomorphometric approach in geocological assessment of groundwater in the territory of the Arkhangelsk region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. – Vol. 834. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012041> (*Scopus*)

16. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., Беленович Т.Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2021. – Т. 163. – Кн. 2. – С. 302-319. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.302-319> (*Web of Science, Scopus*)

*Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:*

17. **Полякова Е.В.**, Малов А.И. Формирование стронций-содержащих подземных вод в Беломорье // Вестник Поморского университета. Сер. Естественные науки, 2005. – №1(7). – С. 39-46

18. **Полякова Е.В.** Возможности подспутникового ДЗЗ с использованием БПЛА CropCam в условиях Европейского Севера // Вестник Поморского университета. Сер. Естественные науки, 2010. – № 2. – С. 22-26

19. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Возможности подспутникового дистанционного зондирования наземных участков с использованием беспилотного летательного аппарата CropCam // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 61-65

20. **Полякова Е.В.**, Игловский С.А. Особенности распределения снежного покрова в условиях субарктического гидротермального урочища Пымващор // Лед и снег, 2012. – № 2(118). – С. 76-80

21. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Применение аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата при составлении цифровой модели местности (на примере субарктического термального урочища Пымващор) // Известия Коми научного центра УрО РАН, 2012. – Вып. 3(11). – С. 52-56

22. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Мониторинг состояния лесных насаждений на территории разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова по данным дистанционного зондирования Земли // Геоинформатика, 2012. – № 2. – С. 45-49

23. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Анализ временных изменений наземных экосистем на территории разработки алмазов им. М.В. Ломоносова по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 78-84

24. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю., Скютте Н.Г., Игловский С.А. Спутниковые и подспутниковые методы исследований наземных гидротермальных экосистем (на примере субарктического термального урочища Пымващор в Большеземельской тундре) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 115-128

25. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Морфометрический анализ рельефа острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 226-234

26. **Полякова Е.В.** Оценка растительного покрова острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли в условиях изменяющегося климата // *Фундаментальные исследования*, 2015. – № 2. – С. 4924-4929

27. Минеев А.Л., **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 // *Современные проблемы науки и образования*, 2015. – № 2. URL: [www.science-education.ru/129-21949](http://www.science-education.ru/129-21949)

28. **Полякова Е.В.**, Мырцева Е.А. Распределения некоторых нормируемых компонентов в подземных водах севера Русской плиты и их воздействие на организм человека // *Успехи современного естествознания*, 2016. – № 10. – С. 140-145

29. **Полякова Е.В.** Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // *Успехи современного естествознания*, 2018. – № 3. – С. 117-122. <https://doi.org/10.17513/use.36712>

30. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.**, Минеев А.Л. Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей перспективных на нефть и алмазы // *Актуальные проблемы нефти и газа*, 2019. – Вып. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8>

31. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2021. – № 2. – С. 86-95. <https://doi.org/10.31857/S0869780921020065>

*Публикации в других рецензируемых журналах и сборниках конференций (РИНЦ):*

32. **Polyakova E.** Activity's on extraction of diamonds influence in territory of Belomorsko-Kulojskoe plateau on a condition of forest communities // *European researcher*, 2011. – Vol. 7 (10). – P. 1118-1125

33. **Полякова Е.В.** Применение методов дистанционного зондирования Земли в изучении арктических термальных экосистем (на примере урочища Пымвашор) // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 2011. – № 5(28). – С. 279-282

34. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Месторождение алмазов в Архангельской области. Космический мониторинг // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*. – Москва: ООО ИТЦ Сканэкс, 2013. Вып. 16. – С. 27-33

35. **Polyakova E.V.** Informazioni Spazio Modalità di Lavorazione e Uso Dello Stesso nell'Artico // *Italian Science Review*, 2013. – Vol. 7. P. 36-42

36. Малов А.И., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Гофаров М.Ю., **Полякова Е.В.**, Старицын В.В., Дурьнин С.Н., Минеев А.Л., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ваганова Н.В., Морозов А.Н., Конечная Я.В. Фундаментальные основы экологически безопасных технологий освоения природных ресурсов Западно-Арктического сектора Российской Федерации. Ч. 2 // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*, 2014. – № 1(9). – 24 с.

37. Кутинов Ю.Г., **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю., Дурьнин С.Н. Составление почвенной карты Соловецких островов с использованием данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения // *Юдахинские чтения. Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в. Материалы докладов Всерос. конференции с междунар. участием*. – Архангельск, 2014. – С. 122-125

38. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и Время*, 2015. – № 3(21). – С. 278-291

39. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Методика построения цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 // *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы II Междунар. научн. конференции*. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 182-185

40. **Полякова Е.В.**, Гофаров М.Ю. Выявление эрозионной активности карстовых северотаежных ландшафтов на основе цифрового моделирования рельефа // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы II Междунар. научн. конференции. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 314-317

41. **Polyakova E.V.**, Myrtseva E.A. Some features of chemical composition of the groundwater in the northern part of the Russian Plate // American Scientific Journal, 2016. – Vol. 1(1). – P. 51-55

42. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Оценка вероятности проявления природных экзогенных геологических процессов на основе цифрового моделирования рельефа // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. – М.: ГЕОС, 2016. – С. 684-688

43. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., **Полякова Е.В.**, Чистова З.Б. Подготовка ЦМР и выбор геоморфометрических параметров для исследования экзогенных процессов северных территорий РФ // Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны. Сборник научных трудов / Отв. редактор В.И. Павленко, 2016. – С. 313-318

44. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // Пространство и Время, 2017. – № 2-3-4(28-29-30). – С. 267-288

45. Кутинов Ю.Г., **Полякова Е.В.**, Чистова З.Б., Минеев А.Л. Отражение структур кристаллического фундамента Архангельской алмазоносной провинции в современном рельефе // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 514-518

46. Кутинов Ю.Г., **Полякова Е.В.**, Чистова З.Б., Минеев А.Л., Мырцева Е.А. Вероятность проявления эрозионных процессов на территории Архангельской области на основе цифрового моделирования рельефа // Risks and safety in rapidly changing world: materials of the VI international scientific conference on May 10-11, 2018. – Prague: Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», 2018. – С. 44-48

47. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Геоэкологическая оценка вероятности активизации карстовых процессов на основе цифрового моделирования рельефа // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата «ГЕОРИСК-2018». Материалы X Междунар. научно-практич. конференции: в 2 томах. – Москва, 2018. – С. 221-225

48. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Геоэкологическое районирование Севера Русской плиты методами цифрового моделирования рельефа // «Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры». – Иркутск, Изд-во ИГУ, 2018. – Вып. 7.

49. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Цифровое моделирование рельефа северных арктических территорий РФ для геоэкологического районирования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2018 год, 2018. – С. 78-89

50. Полякова Е.В. Учет геоморфометрических параметров рельефа при ведении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // Евразийский союз ученых, 2019. – № 3-2 (60). – С. 33-37. DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37)

51. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Оценка состояния подземных вод Юго-Восточного Беломорья на основе цифровой модели рельефа // Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. – Пермь: ПГНИУ, 2019. – Вып. 21. – С. 358-363

52. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.**, Минеев А.Л. Геоморфометрические параметры тектонических узлов как возможные поисковые признаки площадей перспективных на нефть и алмазы // Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии, горной промышленности и экономики (ITES&MP-2019). Материалы V Междунар. конференции, 14-18 октября 2019 г. – М.: ВНИИГеосистем, 2019. – С. 41

53. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Цифровое моделирование рельефа в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии, горной промышленности и экономики (ITES&MP-2019). Материалы V Междунар. конференции, 14-18 октября 2019 г. – М.: ВНИИГеосистем, 2019. – С. 43-44

54. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., **Полякова Е.В.** Цифровое моделирование рельефа для геоэкологического районирования равнинных территорий Севера РФ // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2019. – С. 247-252

55. **Полякова Е.В.**, Минеев А.Л. Применимость глобальной цифровой модели рельефа ArcticDEM для исследований северных территорий РФ // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики. Тезисы докладов международной научной конференции, 2020. – С. 351-353

56. **Полякова Е.В.** Оценка природного состояния подземных вод северных территорий на основе цифровой модели рельефа // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.П. Лавёрова, 2020. – С. 293-296

57. Чистова З.Б., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., **Полякова Е.В.** Возможность применения цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты) // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.П. Лавёрова, 2020. – С. 320-325

58. **Полякова Е.В.**, Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Геоморфометрический подход в геоэкологической оценке подземных вод на территории Архангельской области // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, 2021. – С. 483-488