

На правах рукописи



Попова Александра Александровна

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СЕВЕРА
ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ
ПРОВИНЦИИ ПО ВЕРХНЕМУ ГОРИЗОНТУ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

Специальность: 25.00.08 – инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень 2012

Работа выполнена в ОАО «Фундаментпроект»

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
Ривкин Феликс Менделеевич

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
Пендин Вадим Владимирович
кандидат геолого-минералогических наук,
Булдович Сергей Николаевич

Ведущая организация: Институт минералогии, геохимии и
кристаллохимии редких элементов
(ИМГРЭ)

Защита диссертации состоится: «23» марта 2012 года в 10 часов на
заседании диссертационного совета ДМ 003.042.02 при Институте
криосферы Земли СО РАН по адресу: 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института криосферы
Земли СО РАН по адресу: г. Тюмень, ул. Таймырская, 74.

Автореферат разослан «21» февраля 2012 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просим
направлять по адресу: 625000, г. Тюмень, а/я 1230, факс 8-3452-688-786;
e-mail: sciensec@ikz.ru, lpodenko@mail.ru

Секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Л.С.Поденко

Введение

Актуальность проблемы и постановка темы. Высокие и постоянно возрастающие потребности в углеводородном сырье привели к интенсивному освоению северных нефтегазоносных районов России, расположенных в зоне развития многолетнемерзлых пород – криолитозоне. Принятие оптимальных и экономически обоснованных инженерных решений при проектировании объектов нефтегазового комплекса требует знаний геологического, инженерно-геологического, геокриологического и гидрогеологического строения региона.

Настоящая работа посвящена инженерно-геологическому обеспечению изысканий для обустройства нефтяных и газовых месторождений, строительства трубопроводов и коммуникационных сетей на севере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (НПП). В работе рассматриваются взаимосвязи природных факторов и их значение для картирования инженерно-геокриологических условий верхнего горизонта криолитозоны до глубины 20 м, что определяется зоной взаимодействия природной среды с основными инженерными сооружениями (исключая разведочные и эксплуатационные скважины и другие глубокие выработки).

Север Тимано-Печорской НПП, являясь сложной и динамично изменяющейся природной средой, нуждается в постоянном мониторинге его природных условий, в том числе инженерно-геокриологических. Современные технологии предопределили качественно новый уровень сбора, обработки и визуализации инженерно-геокриологической информации на основе использования геоинформационных систем (ГИС). Это позволяет отображать инженерно-геокриологические условия территории на картографической модели разных масштабов, создавать альбом взаимосвязанных тематических карт, насыщать параметрами связанную с картой базу данных, а также осуществлять оценку изменения природных условий при строительстве и эксплуатации сооружений.

Основной целью работы является разработка геоинформационной картографической модели инженерно-геокриологических условий севера Тимано-Печорской НПП по верхнему горизонту криолитозоны. Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. изучить строение, состав и свойства верхней части разреза криолитозоны, включающих мерзлые, охлажденные и талые породы;
2. выполнить анализ пространственной изменчивости распространения, мощности и температуры многолетнемерзлых пород (ММП), глубин сезонного оттаивания-промерзания пород, экзогенных геологических процессов и образований в современных климатических условиях;
3. разработать методику последовательной генерализации и детализации инженерно-геокриологического районирования при картировании грунтовых толщ верхнего горизонта в различных масштабах на основе использования ГИС;
4. разработать принципы оценочного инженерно-геокриологического картирования территории на основе базовой геоинформационной модели инженерно-геокриологических условий.

Для решения перечисленных задач автором собраны и проанализированы многочисленные литературные и фондовые материалы и обобщены результаты

инженерно-геологических исследований многочисленных проектируемых в 1997-2009 гг. объектов строительства инфраструктуры нефтегазового комплекса. Приоритетная роль отдавалась материалам, полученным при комплексных инженерно-геокриологических исследованиях, включающих бурение, полевую съемку, лабораторные исследования физических и физико-механических свойств грунтов, геофизические исследования.

Основные защищаемые положения.

1. Унифицированная матричная система анализа для всех масштабов картирования строится на сочетании природных факторов, определяющих инженерно-геокриологические условия, а не на их соподчинении; при этом учитывается максимально возможный спектр параметров, который в зависимости от масштаба картирования, инженерно-геокриологических условий конкретного района и назначения карты может трансформироваться, сокращаться или дополняться.

2. Использование ГИС обеспечивает взаимосвязь «база данных – карта» и реализует четырехмерное геоинформационное поле, позволяя создавать новые и обновлять уже существующие картографические модели и пополнять базу данных аккумулярованной в карте информацией.

3. Единая методика картирования с использованием матричной схемы районирования позволяет создавать коррелируемые между собой карты разного масштаба и тематического содержания.

4. Картографическое моделирование инженерно-геокриологических условий с использованием базы данных и расчетных модулей ГИС дает возможность оценивать потенциальное проявление опасных экзогенных геологических процессов и устойчивость территории к различным видам техногенных нагрузок и прогнозируемым климатическим изменениям.

Научная новизна работы.

1. На основе анализа литологического состава и физических свойств грунтов основных геолого-генетических комплексов отложений севера Тимано-Печорской НГП выделены основные типы разрезов, адаптированные для единой геоинформационной системы, применяемой для разных масштабов инженерно-геокриологического картирования.

2. Для верхнего горизонта криолитозоны уточнена региональная шкала типов распространения и среднегодовых температур мерзлых пород; она дополнена различной глубиной залегания кровли ММП в зависимости от поверхностных условий.

3. Усовершенствована методика инженерно-геокриологического районирования для различных масштабов и перехода от мелкомасштабного картирования к крупномасштабному и наоборот.

4. Составлена серия карт инженерно-геокриологического районирования территории (от крупномасштабных до обзорных, включая карту масштаба 1:1000000), которые отражают инженерно-геокриологические условия для верхнего горизонта криолитозоны (до глубины 10-20 м).

5. Для отдельных объектов строительства нефтегазового комплекса созданы альбомы карт, включающие взаимосвязанные и дополняющие друг друга карты районирования: ландшафтного, инженерно-геокриологического и

гидрогеологического, по развитию опасных экзогенных процессов и условиям строительного освоения.

6. Разработаны и апробированы новые методические приемы оценочного картирования устойчивости геологической среды к различным видам техногенного воздействия по потенциальному развитию экзогенных геологических процессов и по условиям строительного освоения на основе базовых геоинформационных картографических моделей.

Практическое значение работы. Геоинформационное картографическое моделирование инженерно-геокриологических условий севера Тимано-Печорской нефтегазонасной провинции – наиболее современный элемент информационного обеспечения инженерно-геологических изысканий, проектирования и мониторинга для эффективного развития нефтегазовой отрасли региона.

Усовершенствованные автором принципы инженерно-геокриологического районирования позволяют:

- отобразить сложные взаимосвязи природной среды: поверхностных условий, литологического состава отложений, распространения и температуры мерзлых, охлажденных и талых грунтов, их свойств, глубины слоя сезонного оттаивания-промерзания, развития экзогенных геологических процессов;

- выделить инженерно-геокриологические районы для построения трехмерных геологических моделей разного масштаба и дать их комплексную характеристику;

- оценить устойчивость геологической среды к конкретному виду освоения территории и спрогнозировать изменение инженерно-геокриологических условий в ходе строительства и эксплуатации месторождений.

Результаты работ были использованы при проектировании объектов инфраструктуры севера Тимано-Печорской НГП – месторождений: Южно-Хыльчуйского, Инзырейского, Висового; нефтепроводов: Мядсейское м-ние – БРП Варандей, Южно-Хыльчуйское м-ние – БРП Варандей, Южно-Шапкинское м-ние – терминал Харьяга, Мусюршорское м-ние – терминал Харьяга, Инзырейское м-ние – терминал Харьяга, терминал Харьяга – Индига, терминал Харьяга – Усинск, Салюкинское м-ние – Черпаюское м-ние; газопровода Бованенково – Ухта; ЛЭП Южно-Хыльчуйское м-ние – БРП Варандей; автодороги Южно-Хыльчуйское м-ние – Дресвянка.

Личный вклад автора. Автор работы, начиная с 1998 г., принимала участие в выполнении полевых и камеральных инженерно-геокриологических исследованиях и изысканиях, в разработке и создании разномасштабных инженерно-геокриологических картографических моделей на объектах строительного освоения севера Тимано-Печорской НГП: месторождения Мядсейское, Тобойское, Инзырейское, Мусюршорское, им. Ю.Россихина, Южно-Хыльчуйское, Северо-Сарембойское, Ардалинское, терминалов БРП Варандей, Харьяга, Дресвянка, Центрально-Хорейверского и более 20 линейных объектов – магистральных и межпромысловых нефте-, газопроводов, автодорог и ЛЭП; участвовала в разработке региональных матричных схем районирования и создании региональной базы данных инженерно-геокриологических условий. Автор участвовала в работах по грантам международных научных проектов #01-2332 «Arctic coastal dynamics of Eurasia: classification, modern

state and prediction of its development based on GIS technology» в 2003-2005 гг. и #6FP EC «CARBO-North» в 2007-2010 гг.

Апробация работы. Основные результаты докладывались на Международных конференциях «Проблемы криологии Земли» (Пушино, 1998), «Мониторинг криосферы» (Пушино, 1999), «Инженерно-геологические изыскания в криолитозоне – теория, методология, практика» (С-Петербург, 2000), «Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты» (Пушино, 2002), «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения» (Пушино, 2003), «Криосфера нефтегазоносных провинций» (Тюмень, 2004), «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли» (Пушино, 2005), «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений» (Тюмень, 2006), «Криогенные ресурсы полярных регионов» (Салехард, 2007); международных конференциях по мерзлотоведению (Швейцария, Цюрих, 2003; Аляска, Фербенкс, 2008); Европейских конференциях по мерзлотоведению (Италия, Рим, 2001; Германия, Потсдам, 2005); второй конференции геокриологов России (МГУ, 2001); международных совещаниях «Динамика берегов Арктики» (С-Петербург, 2003; Канада, Монреаль, 2004), международном научном симпозиуме «140 лет МАМИ» (Москва, МГТУ «МАМИ», 2005), рабочих совещаниях проекта «CARBO-North» (Великобритания, Лондон, 2007; Дания, Копенгаген, 2009, Швеция, Стокгольм, 2010).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения общим объемом 139 страниц, включая 63 рисунка и 26 таблиц. Список литературы составляет 172 наименований, в том числе 7 на иностранном языке.

Благодарности. Автор искренне признательна научному руководителю д.г.-м.н. Ф.М.Ривкину за поддержку и методическую помощь в работе. Особую благодарность автор выражает сотрудникам отдела инженерно-геокриологической съемки и ГИС-технологий (ОИГС) ОАО «Фундаментпроект» к.г.-м.н. И.Л.Кузнецовой и к.г.н. Н.В.Ивановой за критические замечания и советы при подготовке работы. Автор выражает глубокую признательность за деятельное участие и консультации к.т.н. В.И.Аксенову, Ю.В.Власовой, к.ф.-м.н. С.Г.Геворкяну, А.В.Иоспе, к.г.-м.н. М.В.Касымской, Г.И.Клиновой, Т.В.Никитиной, И.С.Пармузину, А.М.Фирсову, И.В.Чехиной. Автор благодарит всех сотрудников ОИГС ОАО «Фундаментпроект» за помощь при проведении совместных работ по тематикам, связанным с диссертационной работой.

Глава 1. Пространственный анализ инженерно-геокриологических условий севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции

Инженерно-геокриологические условия верхнего горизонта криолитозоны севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции формировались на протяжении длительного периода: со среднего плейстоцена до настоящего времени. Закономерности формирования инженерно-геокриологических условий рассмотрены в трудах И.Д.Данилова, В.С.Зархидзе, А.И.Попова, С.Е.Суходольского, В.В.Баулина, Н.Г.Обермана, В.Т.Трофимова и др. и обобщены в монографиях: Геокриология СССР, 1988; Основы геокриологии, 1998; Вечная мерзлота..., 2002.

Для основных геолого-генетических комплексов отложений севера Тимано-Печорской НПП выделены основные типовые разрезы и проанализирован литологический состав и физические свойства мерзлых, охлажденных и талых грунтов. Для исследуемой территории характерна выдержанность состава и специфика свойств грунтов в рамках геолого-генетических комплексов отложений:

- ✓ ледово-морские отложения – преимущественно суглинки, грунты талые и мерзлые слабодлистые;
- ✓ озерно-аллювиальные отложения – переслаивание суглинков, супесей, песков, грунты талые и мерзлые льдистые;
- ✓ отложения казанцевской морской равнины и средних морских и аллювиально-морских террас – суглинки, пески, грунты талые и мерзлые слабодлистые и льдистые;
- ✓ отложения низких морских и аллювиально-морских террас – преимущественно пески, грунты талые и мерзлые слабодлистые, местами засоленные;
- ✓ озерно-болотные отложения – торф, оторфованные суглинки, супеси, пески, грунты талые и мерзлые льдистые и сильнольдистые.

Геокриологические условия севера Тимано-Печорской НПП в целом подчинены широтной зональности. Сжатость ландшафтно-климатических зон в направлении с севера на юг, нечеткие их границы, частое чередование ландшафтов предопределили неоднородность и сложность геокриологических условий верхнего горизонта криолитозоны по сравнению со всей ее толщей. В его пределах границы переходов между геокриологическими зонами весьма размыты и условны, что связано со значительной дифференциацией природных (ландшафтных) условий. Неоднородность геокриологических условий выражается в частом чередовании участков, сложенных мерзлыми породами с поверхности (под слоем сезонного оттаивания), участков с заглубленной кровлей ММП и талыми породами.

Для разномасштабного картирования (от 1:5000 до 1:1000000) определена региональная шкала типов распространения мерзлых и талых пород верхнего горизонта криолитозоны:

- ✓ с преимущественно сплошным распространением ММП – более 80% площади занимают мерзлые породы с поверхности, менее 20% кровля ММП заглублена до 2-5 м;
- ✓ с прерывистым распространением – 50-80% площади ММП с поверхности, 20-50% кровля ММП заглублена до 2-10 м;
- ✓ с массивно-островным распространением – 20-50% площади ММП с поверхности, 50-80% кровля ММП заглублена до 5-10 м и более;
- ✓ с островным распространением – менее 20% площади ММП с поверхности, более 80% талые породы;
- ✓ с преимущественно талыми породами – менее 3% площади с островами и новообразованиями ММП (со спорадическим распространением ММП).

Средние годовые температуры мерзлых пород изменяется от 0 до $-4,5^{\circ}\text{C}$. Глубины годовых колебаний температур варьируют от 9,0 до 15 м, сокращаясь в массивах торфяников до 6,0 м. Основными факторами, влияющими на дифференциацию температур мерзлых пород, являются климат, рельеф, растительность, дренированность поверхности. При этом ведущим фактором, как было

установлено многочисленными предшествующими исследованиями, являются условия снегонакопления, связанные с особенностями мезо- и микрорельефа и высотой растительного покрова, обуславливающие глубину залегания кровли ММП.

Экзогенные геологические процессы (в первую очередь ряд криогенных процессов – сезонное и многолетнее пучение, морозобойное растрескивание, термокарст, солифлюкция, термоэрозия, термоабразия) имеют достаточно широкое распространение, но в естественных условиях не активны.

В настоящее время под влиянием современных климатических факторов отступает на север южная граница распространения ММП и повышается их температура (Игловский, 2001; Оберман, 2004, 2007, 2011; Израэль и др., 2007; Павлов, 2005, 2007); наблюдаются незначительные изменения в развитии экзогенных геологических процессов. Наиболее чувствительна к климатическим изменениям мощность слоя сезонного оттаивания-промерзания, которая зависит от температурного режима воздуха и количества осадков. Влияние климатических факторов и активное освоение исследуемой территории делают необходимым периодичность ее повторного изучения и картирования.

Глава 2. Картографическое моделирование инженерно-геокриологических условий в геоинформационных системах

Картографическая модель является обобщающей комплексной характеристикой инженерно-геокриологических условий территории. Главная задача построения картографической модели заключается в оценке пространственного распределения рассматриваемых параметров на основе геосистемного подхода, методические основы которого и его применение в инженерно-геокриологическом районировании и картировании развивались с 60-70-х годов XX века и постоянно совершенствовались (И.В.Попов, Г.К.Бондарик, Д.Л.Арманд, А.И.Попов, В.А.Кудрявцев, И.С.Комаров, Е.С.Мельников, В.Т.Трофимов, М.И.Горальчук, В.В.Пендин, Д.С.Дроздов и др.).

Геоинформационная система обеспечивает сбор, хранение, обработку и отображение пространственно-координированных данных. Вся информация о выделяемом таксоне аккумулируется в базе данных, главная задача которой – их накопление и систематизация, позволяющие в короткий срок выдать необходимые для пользователя сведения об инженерно-геокриологической изученности любого участка территории. База данных состоит из двух уровней (Рис. 1): 1) фактологического, который формируется из материалов полевых и лабораторных исследований в точках опробования, и 2) компиляционного, где информация проходит последующее дополнение литературными и фондовыми данными, расчет недостающей информации по заданному алгоритму в расчетном модуле и последующее обобщение. На основе компиляционного уровня базы данных разрабатывается матричная схема инженерно-геокриологического районирования и строится карта инженерно-геокриологического районирования.

Инженерно-геокриологическое типологическое районирование выполняется на базе ландшафтного районирования и основано на выявлении взаимосвязей геокриологических характеристик с ландшафтными условиями и геолого-

генетическими комплексами поверхностных отложений (Арманд, 1975; Методика..., 1979; Иванова, 1982; Ландшафты..., 1983; Геокриология, 1988).

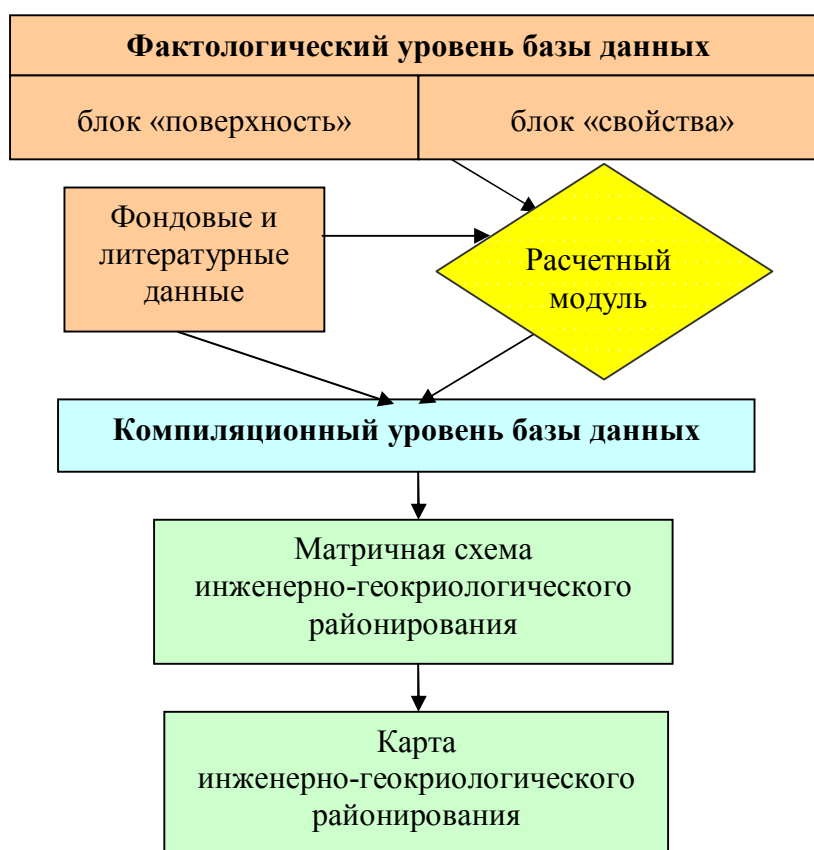


Рисунок 1. Структура базы данных

Матричная система анализа факторов, предлагаемая в настоящей работе, в отличие от иерархических схем районирования, строится на сочетании факторов, а не на их соподчинении (Ривкин, 2005). Для карт всех масштабов севера Тимано-Печорской НПП создана унифицированная легенда. В осях матричной схемы она содержит информацию об основных природных параметрах, определяющих инженерно-геокриологические условия: геоморфологический уровень; характер поверхности (рельеф, дренированность, растительные ассоциации и т.п.); генетическую принадлежность, мощность и состав четвертичных отложений; формации коренных пород (Рис. 2-а); распространение и среднюю годовую температуру ММП; льдистость и засоленность пород; глубину сезонного промерзания-оттаивания; экзогенные процессы и образования (Рис.2-б). При составлении матричной легенды учитывается максимально возможный спектр параметров, который в зависимости от масштаба картирования, конкретного района исследований и назначения карты может трансформироваться, пополняться или сокращаться. Таким образом, матричная схема районирования является не только легендой к карте, но и методом организации и обобщения информации (Ривкин, 2005).

Наличие ГИС, как способа хранения и обработки данных, позволяет для каждого инженерно-геокриологического района выдать содержательную информацию

из легенды (матрицы) и обратиться к фактическому материалу (колонкам скважин, полевым и лабораторным исследованиям грунтов и т.п.).

Геокриологические условия		Геолого-генетические комплексы и криолитологические типы разреза поверхностных четвертич						
		Геоморфологический уровень					Геолого-генетические комплексы	
b) Распространение ММП, %	Температура ММП, °C	Ландшафты	СТС(СМС), м	Экзогенные процессы и образования	Индекс на карте	ледниковые	верхнеплейстоценовые	
						г III ²	г III ¹	
						Суперплейстоценовые: покровы гравия и щебня (до 15-20%), с прослойками песка и супеси. Грунты гравийно-песчаные слабообводненные*	1	
						Торфяно-песчаные: покровы гравия и щебня (до 15-20%), с прослойками песка и супеси, реликты выветривания 3-5 м с прослойками песка и супеси, реликты выветривания гравия и щебня. Грунты гравийно-песчаные слабообводненные*	2	
Сплошное (> 95%)	-1.5...-2.2 	Равнины плоские полигональные кустарничково-мохово-лишайниковые с мочажинами (площадь до 10%) осоково-моховыми по ПЖЛ и отдельными буграми пучения на полигонах	торф 0,4-0,6	ПЖЛ в стадии консервации, локально термокарст по ПЖЛ, мочажинные бугры пучения. Мочажинное растрескивание	a	1a	2a	
	-1.0...-2.0 	Торфяники плоские кустарничково-мохово-лишайниковые с мочажинами (площадь до 50%) осоково-моховыми	торф 0,4-1,2	ПЖЛ в стадии консервации и деградации, термокарст по ПЖЛ и сегрегационным льдам, пучение в мочажинах	б	1б	2б	

Рисунок 2. Матричная система анализа факторов (фрагмент схемы инженерно-геокриологического районирования)

Имея динамическую взаимосвязь «база данных – карта», можно, пополняя фактический уровень базы данных, изменять содержание компиляционного уровня, обновлять карту (корректировать границы районов и их содержательное наполнение), и, благодаря выявленным закономерностям, интерполировать и экстраполировать инженерно-геокриологические условия на менее изученные территории. Таким образом, карта и матричная схема районирования создают четырехмерное геоинформационное поле (4D-модель – x, y, z, t), содержащее комплексную информацию об инженерно-геокриологических условиях исследуемой территории на заданную глубину, изменяемую во времени.

Комплексная информация по каждому району, содержащаяся в базе, может представляться пофакторно. Это дает возможность создавать многослойную геоинформационную модель территории, представленную тематическими картами районирования: инженерно-геокриологического, гидрогеологического, ландшафтного, по условиям строительного освоения и т.п.

Глава 3. Инженерно-геокриологическое районирование севера Тимано-Печорской НГП по верхнему горизонту криолитозоны

Обобщающим элементом анализа данных на различных стадиях исследований является составление картографической модели, отражающей закономерности пространственной изменчивости инженерно-геокриологических условий. В ходе инженерно-геокриологических исследований на севере Тимано-Печорской НГП в 1997-2009 гг. отработывалась и совершенствовалась представленная выше методика инженерно-геокриологического районирования для различных масштабов карт. В

результате составлена серия карт инженерно-геокриологического районирования территории, начиная с детальных (М 1:500-1:1000), крупно- (М 1:2000-1:5000), средне- (М 1:10000-1:50000) и мелкомасштабных (М 1:100000-1:200000) карт трасс трубопроводов, автодорог, ЛЭП, площадных объектов месторождений и зон их влияния и заканчивая обзорной (М 1:1000000) картой севера Тимано-Печорской НГП. Разномасштабные карты, выполненные при помощи ГИС-технологий, взаимодополняют друг друга и позволяют создать целостную многослойную картографическую модель инженерно-геокриологического районирования севера Тимано-Печорской НГП.

Основным методом инженерно-геокриологического картирования всех масштабов являлся ландшафтно-индикационный метод. Источниками информации для составления карт на объектах исследования служили результаты бурения инженерно-геокриологических скважин, геокриологической полевой маршрутной съемки, геофизических исследований (вертикального электрического зондирования и электропрофилирования), дешифрирования топографической основы и аэрофото- или космоснимков высокого разрешения. В процессе картирования природные районы экстраполировались с учетом выявленных закономерностей на основе анализа и дешифрирования топокарт, аэрофото- и космоснимков по комплексу характерных признаков в зависимости от масштаба районирования (Методика..., 1979; Иванова, 1982). Главными ландшафтными параметрами в дешифрировании являлись мезо- и микрорельеф, растительные ассоциации и дренированность поверхности, которые достаточно четко фиксируются как на топоснове, так и на аэрофото- и космоснимках.

Карты инженерно-геокриологического районирования всех масштабов построены по одному принципу: при укрупнении масштаба увеличивается детальность градаций и количество описываемых параметров (например, мезо- и микрорельеф, уклон поверхности, растительность, мощность слоя сезонного оттаивания-промерзания, уровень грунтовых вод и т.д.).

Неоднородность геокриологических условий севера Тимано-Печорской НГП предопределяет основную проблематику геоинформационного картографического моделирования:

- ✓ представление на картах разного масштаба районов с несплошным распространением ММП;
- ✓ картирование засоленных грунтов и криопэгов;
- ✓ принципы районирования по распространению ММП при переходе от одного масштаба в другой;
- ✓ матричная система анализа факторов для субмеридианально ориентированных линейных сооружений значительной протяженности, пересекающих две и более природные зоны.

Для обзорных и мелкомасштабных карт выделение районов с процентным соотношением талых и мерзлых пород вполне логично. В выделяемых районах помимо процентного соотношения площади мерзлых и талых пород с поверхности необходимо учитывать глубину залегания кровли ММП. На картах среднего масштаба без применения процентного соотношения распространения мерзлых и талых пород сложно отобразить торфяники (полигональные и бугристые), крупноблочные

минеральные поверхности с заглубленной кровлей ММП в межполигональных понижениях небольшой ширины и участки с маломощными перелетками и новообразованиями ММП. Даже при увеличении масштаба картирования (вплоть до масштаба 1:1000) не удастся показать собственно мерзлые и талые участки, а только их процентное соотношение. В первую очередь это характерно для участков с крупнокочковатым микрорельефом, где острова мерзлых с поверхности пород диаметром до 2-3 м чередуются с талыми породами или с участками с заглубленной кровлей ММП.

Картирование засоленных грунтов и криопэгов имеет свои особенности. Присутствие криопэгов и засоленных охлажденных пород в разрезе самых северных районов определяют несплошное распространение ММП. Детальные исследования показали, что смена степени засоленности и состояния грунтов не всегда привязаны к смене литологического состава, а наличие засоленных грунтов и криопэгов, как правило, не имеет ландшафтной индикации. Для целостного представления о состоянии грунтов по площади и в разрезе, особенно для средне- и крупномасштабного картирования, важно комплексное исследование территории – ландшафтное описание, бурение, динамическое зондирование, электроразведка, сейсморазведка.

При переходе от мелкого масштаба к более крупному и наоборот выделение районов по распространению ММП проводится как по их площади с поверхности, так и по глубине залегания кровли мерзлых пород. Наиболее характерные типы распространения ММП рассматриваемой территории и их возможное отражение на разномасштабных картах представлено в Таблице 1.

При картировании территорий для проектируемых протяженных объектов в схеме районирования часто приходится опускать описание ландшафтных условий, несмотря на то, что карты строятся на ландшафтной основе. В таких случаях матричная схема районирования включает только собственно инженерно-геокриологические характеристики (геолого-генетические комплексы отложений, их литологический состав и льдистость, распространение и температура ММП); экзогенные геологические процессы и образования показываются на карте внесмасштабными условными знаками.

Анализ фактического материала, накопленного за последнее десятилетие при исследовании севера Тимано-Печорской НГП, позволил уточнить границы распространения, состав многолетнемерзлых и талых пород и составить карту инженерно-геокриологического районирования территории масштаба 1:1000000. Карта содержит информацию для верхнего горизонта криолитозоны (до глубины 10-20 м), находящегося в зоне теплового и механического воздействия инженерных сооружений. Этот горизонт характеризуется наиболее сложными и неоднородными инженерно-геокриологическими условиями, что нашло отражение на составленной карте.

Анализ карты инженерно-геокриологического районирования масштаба 1:1000000 (Rivkin, Porova, Ivanova, 2005) выполнен в матричной форме, где для обширной территории севера Тимано-Печорской НГП показано все разнообразие природных факторов, обуславливающих большую дифференцированность инженерно-

геокриологических условий (Рис. 3). В горизонтальной оси матрицы отображены геоморфологические уровни, генезис и возраст отложений, выделены основные инженерно-геокриологические типы разрезов. По уникальному сочетанию признаков 42 выделенным таксонам присвоен цифровой индекс и ведущее изобразительное средство – цвет. В районах с близким (до 2-20 м) залеганием под четвертичными отложениями коренных пород их формация указана дополнительным буквенным индексом.

В вертикальной оси матрицы, исходя из закономерностей распределения мерзлых и талых пород на рассматриваемой территории, определено 16 градаций распространения многолетнемерзлых пород и их средние годовые температуры. Эта информация на карте заключена в буквенном индексе и штриховке.

Таблица 1. Региональная шкала типов распространения ММП на инженерно-геокриологических картах в разных масштабах

			Масштаб картирования								
			1:500 000 – 1:1 000 000		1:100 000 – 1:200 000		1:10 000 – 1:50 000		1:2 000 – 1:5 000		1:1 000 – 1:500
	с поверхности	с заглубленной кровлей									
Сплошное	>95% площади	<5% площади с глубины 2-5 м									
	>80% площади	<20% площади с глубины 2-10 м									
Прерывистое	50-80% площади	20-50% площади с глубины 2-10 м и более									
		20-50% площади с глубины 2-5 м									
		20-50% площади с глубины 5-10 м									
		20-50% площади с глубины 10 м и более									
Массивно-островное	20-50% площади	50-80% площади с глубины 2-10 м и более									
		50-80% площади с глубины 2-5 м									
		50-80% площади с глубины 5-10 м									
		50-80% площади талые породы									
Островное	<20% площади	>80% площади талые породы									
	<5% площади	>95% площади талые породы									
Талые	талые породы	кровля ММП с глубины 5-10 м									
	талые породы по всему разрезу										

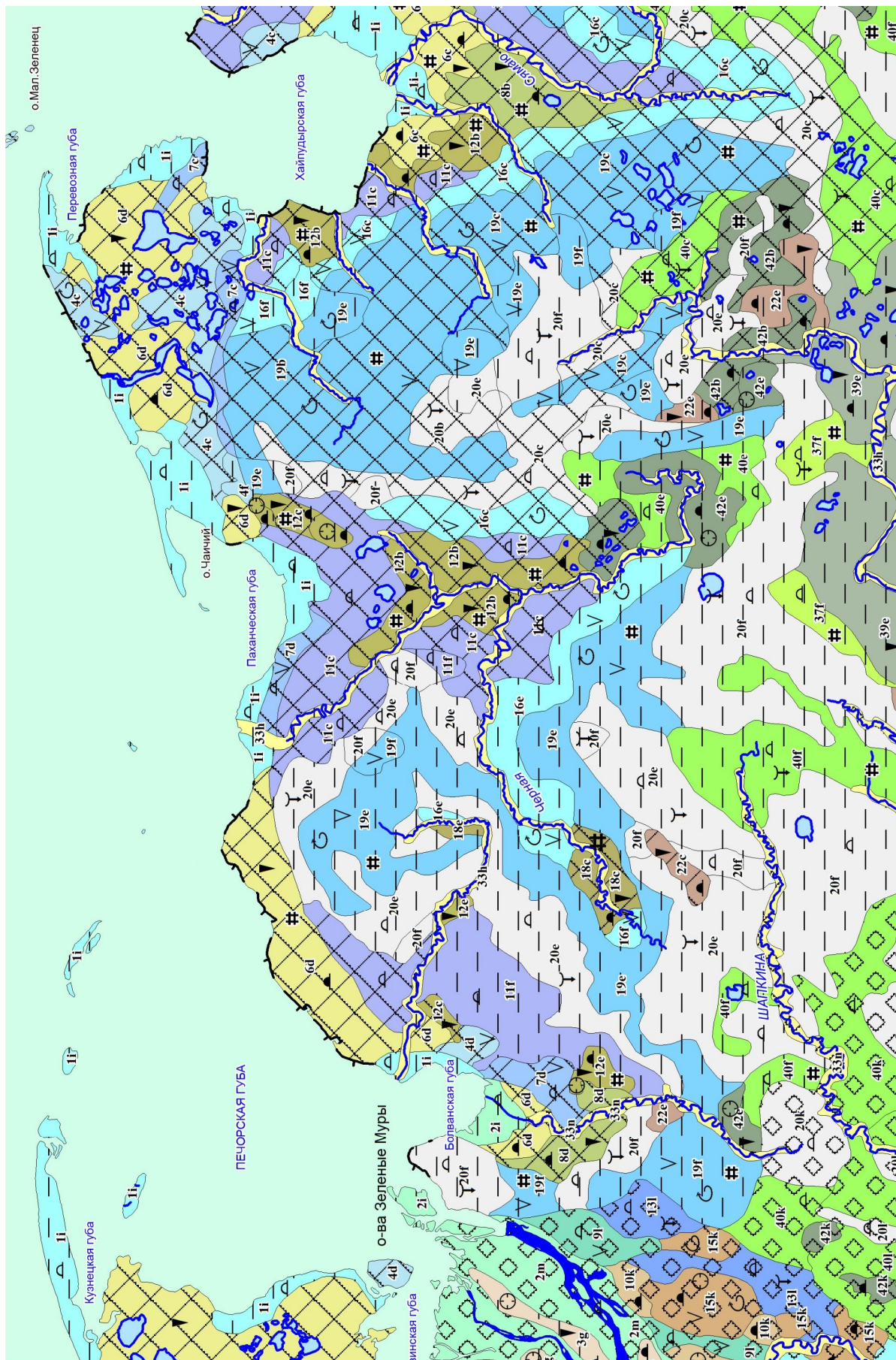


Рисунок 3. Фрагмент карты инженерно-геокриологического районирования севера Тимано-Печорской НГП

Для каждого таксона инженерно-геокриологического районирования выделены основные экзогенные процессы и образования (многолетнее и сезонное пучение, термокарст, морозобойное растрескивание, ПЖЛ, солифлюкция, эрозия/термоэрозия, оползни, дефляция, термоабразия), которые показаны на карте внемасштабными условными знаками.

Карта дополнена региональной базой данных, содержащей информацию о геокриологических условиях, геолого-генетических комплексах отложений и физических свойствах, слагающих их грунтов. Картографическая модель не только аккумулирует в себе анализ данных последних лет и наглядно отображает сложные инженерно-геокриологические условия территории, но и позволяет динамично изменять представление о них по мере накопления нового фактического материала.

Выполненное мелкомасштабное геоинформационное картографическое моделирование отражает современные инженерно-геокриологические условия территории для верхнего горизонта криолитозоны. Сравнение этой карты с мелкомасштабными картами, построенными по данным 50-80-х годов (Карта инженерно-геологических условий Нечерноземной зоны РСФСР, 1983; Геокриологическая карта СССР, 1996), выявило динамику геокриологических условий, в первую очередь повышение средней годовой температуры мерзлых пород и сокращение площадей их распространения.

Глава 4. Оценочное картирование с использованием ГИС

Основная задача прогноза инженерно-геокриологических условий – оценить устойчивость геологической среды к техногенным нагрузкам и потенциальному проявлению опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Систематизация факторов и оценка инженерно-геокриологических условий рассматривались многими исследователями. Количественные методы оценки инженерно-геокриологических условий предлагались Л.С.Гарагулей, М.А.Минкиным, В.В.Пендиным и др. В связи с большим разнообразием факторов и трудоемкостью их оценки, часто применялась экспертная балльная оценка, основанная на качественном анализе параметров (В.П.Чернядьев, И.И.Шаманова, С.Е.Суходольский, И.Л.Кузнецова и др.).

В настоящей работе оценка потенциального развития процессов и устойчивости территории к техногенным нагрузкам рассчитывается по количественным показателям, но сводится к балльной системе, от которой не удастся отойти в силу рассмотрения большого числа разнонаправленных процессов и разноразмерных показателей факторов оценки. Моделирование инженерно-геокриологических условий в ГИС дает возможность наглядно продемонстрировать все их многообразие и оценить характер взаимодействия с различными техногенными нагрузками. В качестве основы оценочным картам служит карта инженерно-геокриологического районирования. Закладываемые в расчет параметры выбираются из компиляционного уровня базы данных. Анализ факторов происходит по алгоритму, где для каждого района по встречаемости оцениваются состав пород и их физические свойства на заданной глубине грунтового массива. Специальные оценочные параметры вычисляются встроенными программными расчетными модулями. Визуализация решения задачи представляется в виде оценочных карт: карты потенциального развития экзогенных

геологических процессов и карты районирования территории по условиям строительного освоения (Рис. 4).

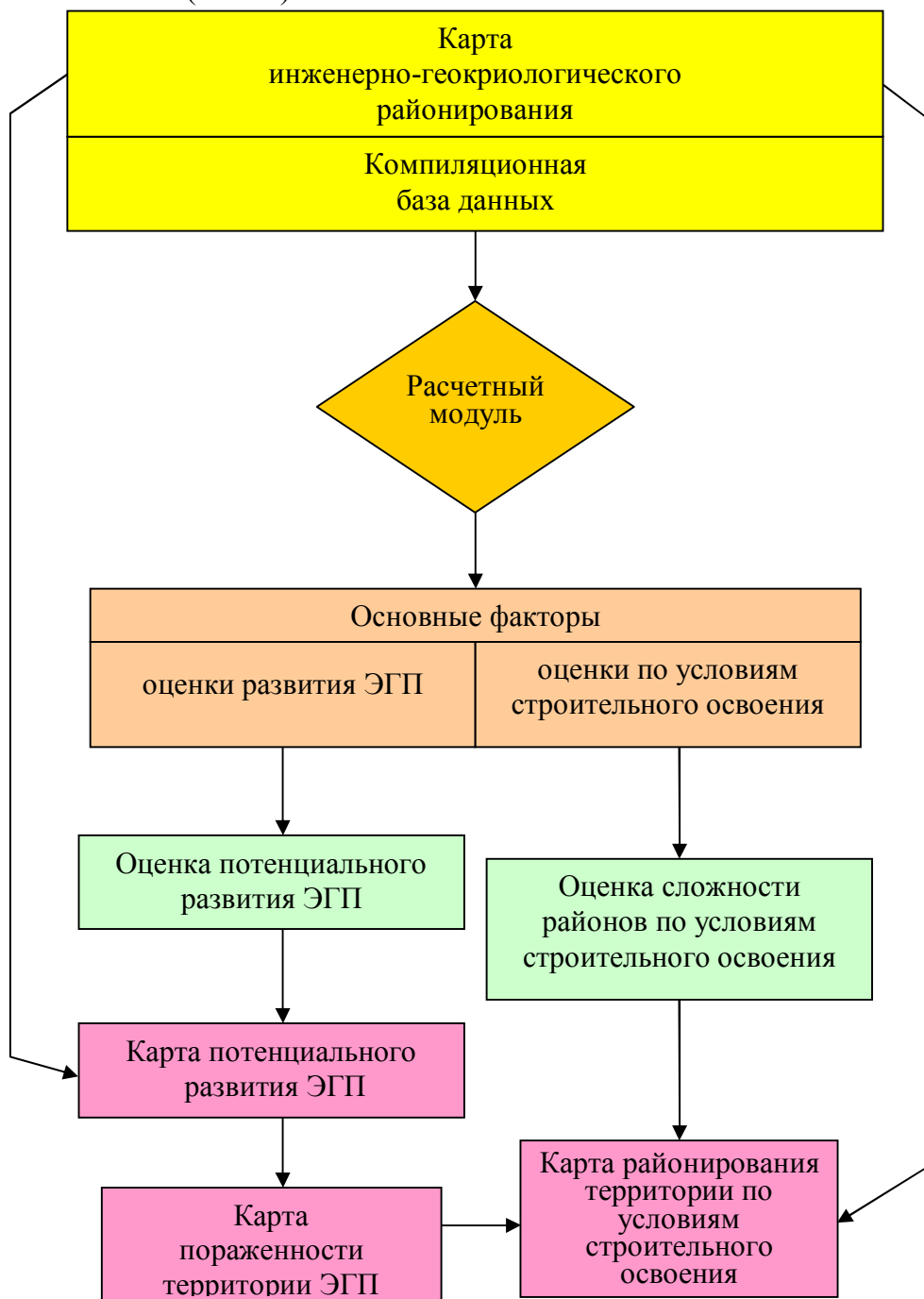


Рисунок 4. Алгоритм составления оценочных картографических моделей

Предлагаемая методика оценочного картирования позволяет отказаться от многослойности пофакторных карт, широко используемых в инженерной геологии и геокриологии, и, используя ГИС-технологии, существенно оптимизировать их составление.

Экзогенные геологические процессы существенно влияют на равновесие природных экосистем и устойчивость оснований сооружений. В работе рассмотрены основные криогенные процессы: пучение, морозобойное растрескивание, термокарст, термоэрозия и солифлюкция. При нарушении естественных условий при любом виде хозяйственного освоения отмечается либо существенная активизация процессов, либо

их затухание. Оценка потенциального развития процессов в инженерно-геокриологическом районе определяется рядом природных факторов по методике Л.С.Гарагули (Гарагуля, 1985; Основы геокриологии, 2001). Потенциальное развитие процессов может быть смоделировано как для естественных условий, так и для различного рода их нарушений путем изменения входящих в расчет параметров, реагирующих на мощность снежного покрова, температуру воздуха, уровень грунтовых вод и т.д. Каждый фактор оценивается по степени опасности для развития процесса в балльной системе, при этом приоритетным считается наиболее опасный фактор и выбирается его оценочный балл. Для оценки распространения процесса по площади района (пораженности территории) полученный балл в зависимости от условий развития процесса на мерзлых или талых грунтах умножается на процентное соотношение распространения соответствующих грунтов в рассматриваемом районе.

Оценку территории можно дать не только по каждому процессу в отдельности, но и по совокупности всех рассматриваемых процессов, т.е. оценку пораженности района экзогенными геологическими процессами. Для этого использовалось известное в векторной алгебре равенство Парсеваля для системы разнонаправленных векторов, применяемое при суммировании независимых измерений в бесконечной системе координат (Вентцель, 1964; Комаров, 1972; Родионов и др., 1987). Основные показатели для оценки ЭГП в этом случае являются системой координат, рассматриваемые процессы – системой векторов:

$$A_{\text{общ}} = \sqrt{\sum (A_n P_n)^2}, \quad (1)$$

где $A_{\text{общ}}$ – общий балл оценки пораженности района экзогенным геологическим процессом, A_n – балл оценки потенциального развития процесса, P_n – площадь пораженности процессом в процентном выражении от площади инженерно-геокриологического района.

Оценка территории по потенциальному развитию процессов успешно применялась при проектировании трассы нефтепровода «Мусюшорское месторождение – терминал Харьяга» на стадии технико-экономического обоснования. Результатом работы явилась серия карт масштаба 1:100000 с тремя вариантами трассировки нефтепровода. На рисунке 6 приведены карта по потенциальному развитию пучения (Рис. 5-а) и карта суммарной пораженности экзогенными геологическими процессами (пучение, солифлюкция, термокарст, термоэрозия) (Рис. 5-б) с циклограммами распределения районов по вариантам трассы, на которых наглядно видно, что 1 вариант прокладки трассы проходит по районам подверженным пучению, но с наименьшей пораженностью процессами по их совокупности.

Оценка территории по условиям строительного освоения подразумевает районирование территории по основным факторам, определяющим специфику инженерно-геокриологических условий: 1) распространение ММП; 2) средняя годовая температура ММП; 3) для талых грунтов: консистенция для глинистых грунтов и водонасыщенность для песчаных грунтов; 4) льдистость мерзлых грунтов; 5) засоленность грунтов; 6) пучинистость грунтов; 7) уклон поверхности; 8) уровень грунтовых вод; 9) активизация экзогенных геологических процессов в нарушенных условиях; 10) затопляемость территории паводковыми водами.

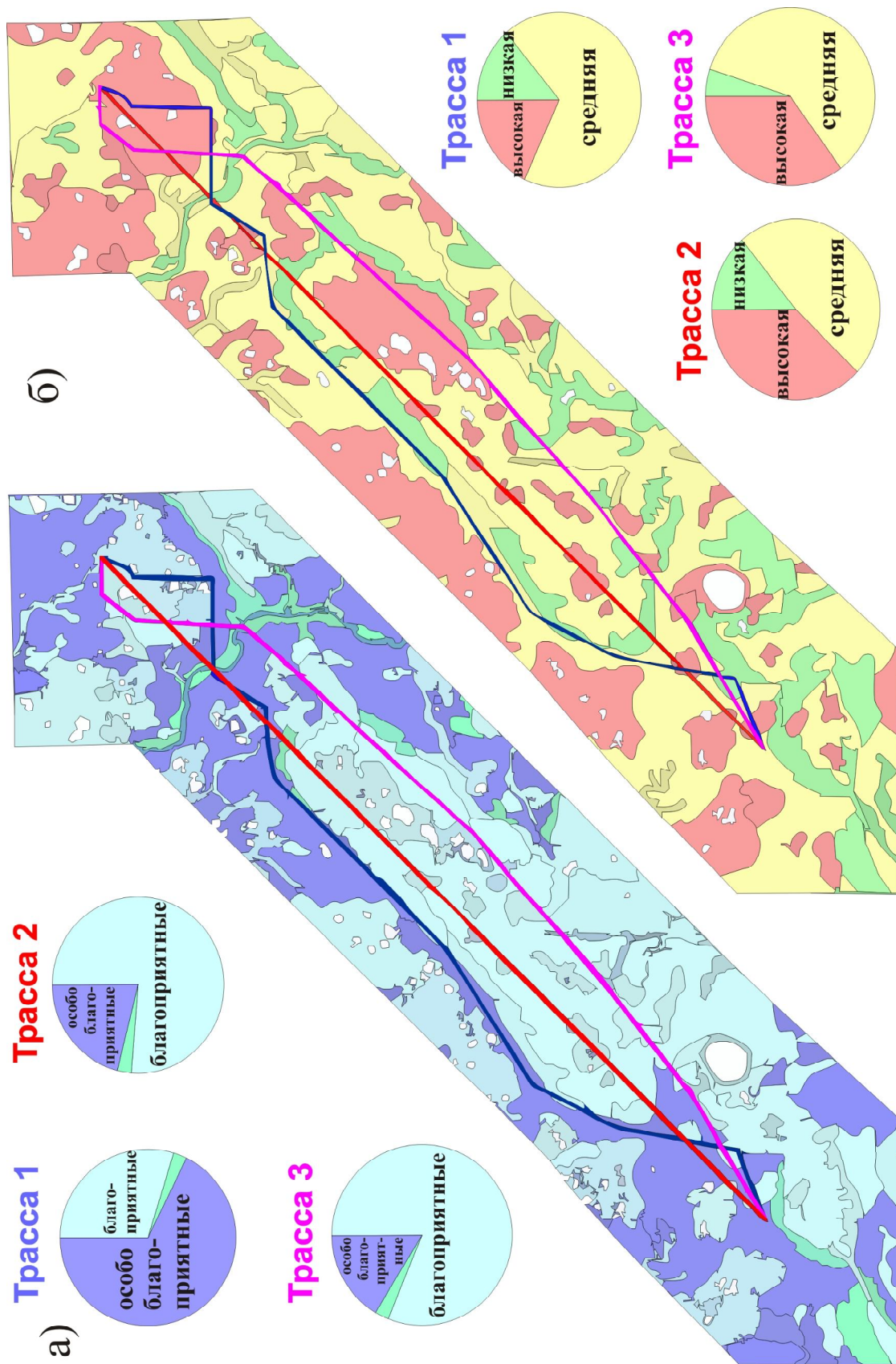


Рисунок 5. Распределение районов с различными условиями развития пучения (а) и районов с суммарной пораженностью экзогенными геологическими процессами (б) по осям трех вариантов трассы «Мушюрское месторождение – терминал Харьяга»

Состав грунтов анализируется опосредованно по их свойствам (консистенция / водонасыщенность, льдистость, засоленность, пучинистость).

В зависимости от масштаба картирования, разнообразия инженерно-геокриологических условий, класса ответственности сооружения и технологии его эксплуатации количество групп факторов и их градации могут изменяться, в том числе добавляться физико-механические свойства грунтов.

Мощность рассматриваемого грунтового среза (массива) принимается равной мощности природно-технической системы и зависит от конкретного вида техногенных нагрузок (от типа и глубины заложения фундамента, технологии эксплуатации сооружения и т.п.). В расчет принимаются литологические разности и свойства грунтов с встречаемостью на заданной глубине грунта выше 25%, образуя либо однослойный (>50%), либо многослойный разрез грунтовой толщи (<50%). Видом сооружений определяется значимость факторов в группе – чем выше опасность фактора для возводимого объекта, тем выше балл.

После пофакторной оценки для определенного вида техногенной нагрузки в каждом районе рассчитываются общие баллы по совокупности всех качественных и количественных факторов, на основе которых строится карта оценки территории по условиям строительного освоения. Для расчета используется упомянутое выше равенство Парсевалья:

$$A_{\text{общ}} = \sqrt{\sum(A_n)^2}, \quad (2)$$

где $A_{\text{общ}}$ – общий балл сложности по условиям строительного освоения, A_n – балл оценки по фактору.

Карты районирования территории по условиям строительного освоения масштаба 1:5000 построены по предлагаемой методике на ключевом участке около г. Воркута в полосе магистрального газопровода «Бованенково-Ухта» (Рис.6). На картах выделены наименее сложные, умеренно сложные, сложные и крайне сложные инженерно-геокриологические условия для нескольких видов техногенных нагрузок: прокладки подземного трубопровода с отрицательной температурой продукта (Рис. 6-а) и с положительной температурой продукта (Рис. 6-б). По составленным картам определяются оптимальные условия для трассировки линейных сооружений.

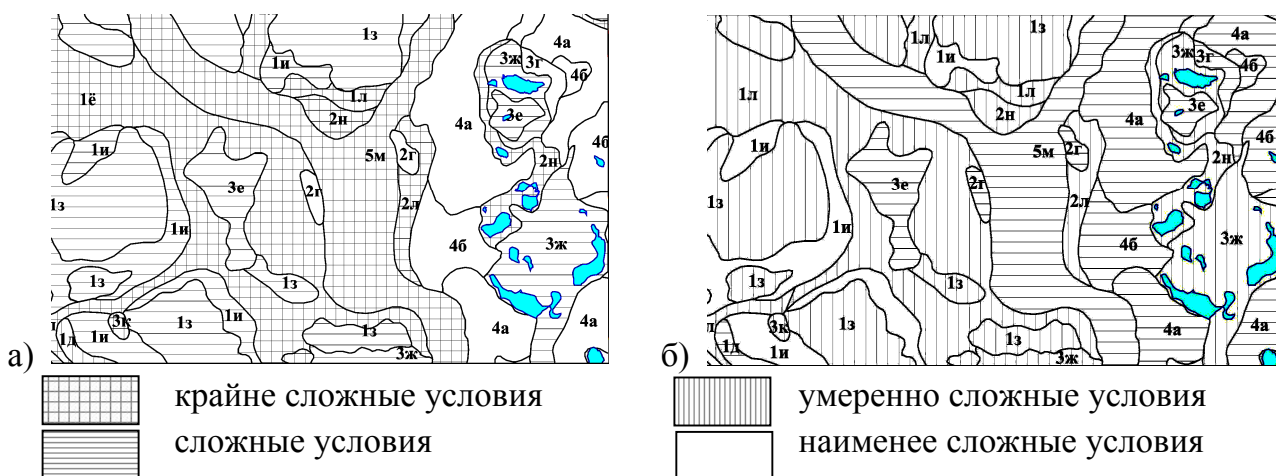


Рисунок 6. Фрагменты карт районирования по условиям строительного освоения ключевого участка «Воркута»

Выводы

Выполненное геоинформационное картографическое моделирование современного состояния инженерно-геокриологических условий севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции позволяет сделать следующие выводы.

1. Пространственный анализ инженерно-геокриологических условий позволил выделить основные типы разрезов с характерными свойствами наиболее распространенных геолого-генетических комплексов отложений и уточнить региональную шкалу типов распространения мерзлых пород с различной глубиной залегания их кровли и средними годовыми температурами.

2. Сложные взаимосвязи факторов природной среды адаптированы для единой геоинформационной системы, применяемой для разных масштабов инженерно-геокриологического картирования. Использование ГИС обеспечивает взаимосвязь «база данных – карта» и реализует четырехмерное геоинформационное поле, позволяет создавать и обновлять уже существующие картографические модели района исследований и пополнять базу данных.

3. Усовершенствованная методика инженерно-геокриологического районирования на основе матричной системы анализа, учитывающей спектр основных природных факторов, определяющих инженерно-геокриологические условия, позволяет переходить от мелкомасштабного картирования к крупномасштабному и наоборот и создавать коррелируемые между собой картографические модели разного тематического содержания. На основе этой методики составлены альбомы тематических карт (от крупномасштабных до обзорных), включая карту инженерно-геокриологического районирования севера Тимано-Печорской НПП масштаба 1:1000000.

4. Разработанные новые методические приемы оценочного картирования на основе базовой геоинформационной модели инженерно-геокриологических условий территории дают возможность спрогнозировать изменение инженерно-геокриологических условий в ходе строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры месторождений. Полученные результаты реализуются в картах районирования по потенциальному проявлению опасных экзогенных геологических процессов и устойчивости территории к различным видам техногенных нагрузок, что позволяет выбирать оптимальные условия размещения различных типов сооружений и проводить мониторинг равновесия природных экосистем.

Публикации по теме диссертации:

1. Геворкян С.Г., **Попова А.А.** К решению задачи об изменении агрегатного состояния слабодистых пород // Материалы гляциологических исследований, № 99, 2005, с.174-176.

2. Геворкян С.Г., **Попова А.А.** К применению гиперболического закона теплопроводности в исследованиях фазовых переходов в льдосодержащих горных породах // Материалы гляциологических исследований, № 100, 2006, с.168-171.

3. Ривкин Ф.М., Корейша М.М., **Попова А.А.**, Левантовская Н.П., Чехина И.В. Опыт использования ГИС–технологий при инженерных изысканиях // Сборник

докладов международной конференции «Инженерно-геологические изыскания в криолитозоне – теория, методология, практика», С-Петербург, 2000, с.230-235.

4. Шаманова И.И., Ривкин Ф.М., **Попова А.А.** Инженерно-геокриологическое картирование для проектирование магистральных трубопроводов на равнинных территориях Севера // Материалы Второй конференции Геокриологов России, Том 4, МГУ, 2001, с.309-315.

5. Чехина И.В., Ривкин Ф.М., Корейша М.М., **Попова А.А.** Использование геоинформационных технологий при проведении геокриологических исследований // Труды Международной конференции «Новые типы инженерно-геологических и эколого-геологических карт», МГУ, 2001, с.159

6. **Popova A.A.** Results of the Engineering Geocryological Mapping of the Pechora Sea Arctic Coast (the Key Site of the Varandey Peninsula) // 8-th International Conference on Permafrost, Extended Abstracts Reporting Current Research and New Information, Zurich, Switzerland, 2003, pp.131-132.

7. **Popova A.A.**, Rivkin F.M., Ivanova N.V., Koreisha M.M., Chehina I.V., Rachold V., Nikiforov S.L. The Map of Engineering Geocryological Zoning of Peninsula Varandei and Adjoining Shallow Shelf Zone // Arctic Coastal Dynamics, Report of the 4th International Workshop, VNIIOkeangeologia, St.Petersburg, 2003, pp. 49-51.

8. **Попова А.А.**, Иванова Н.В. Результаты инженерно-геокриологического картирования полуострова Варандей и прилегающей мелководной зоны шельфа // Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций», Тюмень, 2004, с.130.

9. Чехина И.В., Ривкин Ф.М., Корейша М.М., **Попова А.А.** Построение оценочных карт природных рисков появления криогенных процессов на побережье полуострова Варандей // Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций», Тюмень, 2004, с.131.

10. Kuznetsova I.L., **Popova A.A.** Procedure Engineering-Geocryological Dividing into Districts and Mapping for an Estimation of Risk of Development of Hazardous Cryogenic Processes at Construction Oil-and-Gas Pipes in the North Russia // International Symposium on Latest Natural Disasters- New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection, Sofia, 2005, <http://www.naturaldisasters-sofia.com/en/topics3.htm>

11. **Popova A.A.**, Rivkin F.M., Ivanova N.V. Map of Engineering-Geocryological Zoning of European North-East, Scale 1:1 000 000 // 2nd European Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, Abstract, 2005, pp.190-191.

12. Аксенов В.И., Геворкян С.Г., Иоспа А.В., **Попова А.А.** Характеристика грунтовых условий северо-западной части Большеземельской тундры // Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений, Тезисы докладов, Том I I, Тюмень, 2006, с.196-199.

13. Rivkin F.M., Vlasova J.V., **Popova A.A.**, Mazhitova G., Kuhry P., Parmuzin I.S., and Chehina I.V. Mesoscale and Detailed Geocryological Mapping as a Basis for Carbon Budget Assessment (East European Russian Arctic, CARBO-North Project) // 9th International Conference on Permafrost, University of Alaska, Fairbanks, Volume 2, 2008, pp.1493-1498.

14. Ривкин Ф.М., Кузнецова И.Л., Иванова Н.В., **Попова А.А.**, Пармузин И.С. Многоцелевое картирование как информационное сопровождение инженерных изысканий, проектирования и мониторинга // Материалы IV конференции геокриологов России, Том III, МГУ, 2011, с.300-305.

15. Иоспа А.В., **Попова А.А.** Методика оценки по несущей способности грунтов и условиям строительного освоения территорий в зоне распространения ММП // Материалы IV конференции геокриологов России, Том III, МГУ, 2011, с.279-285.