

КАМЧАТСКИЙ ОТДЕЛ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА СССР

С. Н. РЫЧАГОВ

КАРТИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ КАК МЕТОД ПРОГНОЗА ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

Постановка проблемы

Известно, что физико-геологические процессы в слое мерзлоты возникают под влиянием изменения теплового состояния пород и фазовых переходов содержащейся в них воды (Гречищев и др., 1980). «Под воздействием теплообмена возникают процессы переноса вещества (жидкой воды, водяных паров и внутрипорового газа, химических компонентов, минеральных частиц), которые являются одной из причин пучения пород при их промерзании, а также физического и химического выветривания, коагуляции и диспергации агрегатов минеральных частиц, скелета пород и т. д.» (Гречищев и др. 1980, с. 4). В тесной связи с этими физическими процессами развиваются и механические процессы: внутренние напряжения и деформации, осадка и течение пород, образование трещин различного происхождения, реологические и термореологические процессы. Исследователи отмечают, что криогенные и посткриогенные, связанные с ними, процессы не ограничиваются преобразованием рельефа, и такие компоненты природной среды, как почва, растительность, водный режим и микроклимат также претерпевают существенные изменения (Попов, 1967). Более того, «криогенные процессы являются и важным фактором литогенеза» (Попов, 1967, с. 25). Отдельные ученые указывают также на связь промерзания и оттаивания грунтов и гидрогеологических условий с тектонической нарушенностью пород (Каган, Кривоногова, 1978). Подчеркивается, что криогенные процессы (в частности, образование трещин в мерзлых грунтах) определяются многими экзогенными (Подборный, 1978), а, по-видимому, и некоторыми эндогенными факторами.

Таким образом, существуют постоянные указания на то, что все основные (наиболее распространенные) процессы, связанные с перераспределением тепла в слое мерзлоты, определяются поступлением энергии от внешнего (по отношению к промерзающей толще) источника, каковым служит не только солнечная радиация, но и эндогенный тепломассопоток. Однако этот момент учитывается не в достаточной степени большинством исследователей. Обычно решается прямая задача прогноза состояния мерзлых грунтов и характера протекания криогенных процессов — с помощью привлечения данных по тектонической нарушенности и физическому состоянию скальных горных пород (Блэк, 1958; Гречищев и др., 1980; Мерзлотно-геологические процессы... 1982). В настоящей работе предпринята попытка показать широкие возможности решения обратной задачи — прогнозировать степень тектонической нарушенности горных пород и их физико-химическое состояние с помощью комплексного изучения толщи мерзлых грунтов. Поскольку работа носит постановочный характер, в ней рассмотрена только качественная сторона вопроса.

Краткая характеристика условий образования мерзлых грунтов района исследований

Район исследований — ряд рудных полей севера Камчатской области, центральной части Корякского нагорья — характеризуется суб-

арктическим климатом: продолжительной суровой зимой (средние температуры $-25 \div -27^\circ\text{C}$) и коротким холодным летом ($+7 \div +8^\circ\text{C}$). Снежный покров достигает мощности 4—5 м в долинах водотоков (и в горных выработках) и практически отсутствует на водоразделах и вершинах низкогорья из-за постоянных северных ветров. Водоразделы сглаженные, с пологими (до 15°) склонами. Профили эрозионных долин, а также геологические данные свидетельствуют о том, что район испытывает устойчивое неотектоническое поднятие. Долины рек широкие (до 2—3 км) с двумя-тремя надпойменными террасами. На примыкающих к поднятиям территориях имеется большое количество озер и заболоченных участков, по-видимому, термокарстового происхождения. Термокарстовые проявления наиболее типичны для территории, примыкающей к Парапольскому долу — крупной депрессионной структуре. Локальные участки горных пород отмечаются повышенными водопритоками во все времена года, что может быть, в частности, связано с поступлением воды из Таловского и других озер Парапольского дола. На наличие интенсивной циркуляции воды, как поверхностной, так и подмерзлотной, указывают состав (в среднем дацитовый с большим содержанием в цементе легко выщелачиваемых кислых стекол) и текстурные особенности (трещиноватые, пористые, обломочные) пород. Высокая пористость пород, с одной стороны, способствует льдообразованию — в трещинах, порах, пустотах и увеличению внутренних напряжений; с другой стороны, создает дополнительные условия для локальной деградации мерзлоты — образованию сквозных и поверхностных таликов, термокарстовых проявлений.

Трещиноватость и пористость пород увеличивается на участках распространения гидротермально измененных пород — пропилитов, вторичных кварцитов, монокварцитов и аргиллизированных кварцитов, мощность которых равна или больше мощности толщи мерзлых горных пород. Таким образом, в пределах центральных частей вулканогенных рудных полей и на отдельных участках их периферии (Рычагов, 1984) мерзлые грунты лежат в слое рыхлых и пористых (до 50% и выше) гидротермально измененных пород.

Мощность многолетнемерзлых пород по данным бурения скважин оценивается в 150—200 м. Причем, рельеф подошвы слоя многолетнемерзлых пород представляет собой поверхность, на которую накладываются участки (воронки, трубы) протавивания. За счет этого подошва приобретает вид сложной волнистой поверхности с пятнами-трубами деградации мерзлоты в зонах пересечения разломов. Такой же характер поверхности имеет и кровля слоя мерзлоты вследствие развития таликов в тектонических структурах. Форма подошвы мерзлотного слоя упрощается по направлению от вершин гор и водоразделов к поймам рек.

Глубина сезонного оттаивания на южных склонах достигает 1—1,5 м, на северных — не более 0,5 м. Оттаиванию препятствует повсеместно развитый моховой покров, заросли ольхи, карликовой березы и кедрового стланика. Одна из причин локального протавивания мерзлых пород на большую глубину — антропогенный фактор: проходка горных выработок и скважин, строительство поселков, электростанций и других сооружений, ликвидация растительного покрова. В долинах рек вечная мерзлота распространена не повсеместно.

Приведенная краткая характеристика условий образования толщи мерзлых грунтов и изменения ее основных параметров свидетельствует в пользу необходимости учета всех процессов и явлений, происходящих в слое мерзлых пород, вызванных как экзогенными, так и эндогенными, как природными, так и антропогенными причинами.

Аспекты картирования мерзлых грунтов в связи с изучением горных пород и структур разрушения

В районе исследований имеют место все наиболее распространенные криогенные процессы: термокарст, пучение и криогенное растрескивание грунтов, приводящие к образованию аласов и других форм термокарста, структурных грунтов и ледяных жил.

Структурные грунты состоят из ячеек пяти-шестигранной формы (реже трех-четырёхгранной) размером от 1 до 100 м. На гистограммах выделяются два размерных класса ячеек: первый — от 1 до 10 м, второй — 50—100 м. В целом, описываемые структурные грунты являются типичными образованиями (см. — Мерзлые горные породы Аляски и Канады, 1958; Гречищев и др., 1980; и мн. другие работы). Остановимся на некоторых «нетипичных» признаках структурных грунтов.

Структурные грунты вулканогенных рудных полей района, как правило, развиваются на гидротермально измененных породах (вторичных кварцитах и аргиллизированных кварцитах, характеризующихся рыхлой пористой — до 50% и выше — текстурой) в аллювиально-делювиальных отложениях надпойменных террас (первой и, частично, более высоких). Горными выработками обнаружена повышенная трещиноватость пород в пределах ячеек структурных грунтов. В гранях ячеек установлено большое количество обломков рыхлых ожелезненных вторичных кварцитов-аргиллизитов с зеркалами и бороздами скольжения. Этот факт, по-видимому, можно объяснить двояко:

1) мерзлые грунты развиваются по тектонически нарушенным горным породам с наличием в них зеркал и борозд скольжения, вымораживание обломочного материала приводит к концентрации обломков с зеркалами и бороздами скольжения в гранях ячеек;

2) зеркала скольжения образуются криогенными процессами путем выдавливания мягкого аргиллизированного материала на поверхность по земляным или ледяным клиньям. Такая возможность вполне вероятна в связи с наличием нескольких внутренних источников поля напряжений в мерзлых грунтах: увеличение объема за счет пор замерзания, сила, растущих кристаллов льда (Сумгин и др., 1940), а также внешних источников поля напряжений (приток воды извне в открытые трещино-брекчиевые зоны и создание дополнительного гидростатического давления, неотектонические подвижки). По-видимому, наиболее благоприятны условия для возникновения зеркал и борозд скольжения в структурных грунтах в случае наличия и внешних, и внутренних источников поля напряжения. Р. Блэк (1958) прямо указывает на подвижки, происходящие внутри ледяных клиньев, но, к сожалению, не дает масштабы подвижек. Признаками подвижек являются: «изломы и рекристаллизация зерен, напряжения в разрывах, срезы слоев воздушных пузырьков и включений куполообразной верхней поверхности клиньев, растянутость отложений на сторонах клиньев и неровность поверхности» (Блэк, 1958, с. 13).

На высоких террасах широко распространены изометричные образования, которые можно отнести к структурным грунтам. Вероятно, их формирование также связано с протаиванием мерзлых пород на локальных участках. Это округлые пятна, круги красно-бурого глинистого (с поверхности) материала, ограниченные четкой полоской растительности. Горизонтальный и вертикальный разрезы образований изучены в ходе поисковых работ на гидротермальное оруденение. Материал внутри кругов отличается от вмещающих грунтов однородностью по латерали и вертикали (рис. 1). Основная нижняя часть аллювиально-делювиальных отложений в пределах круга представлена дресвяно-щебнисто-глинистым материалом, в то время как во вмещающих породах соответствующая вертикальная зона сложена резко более грубыми обломками,

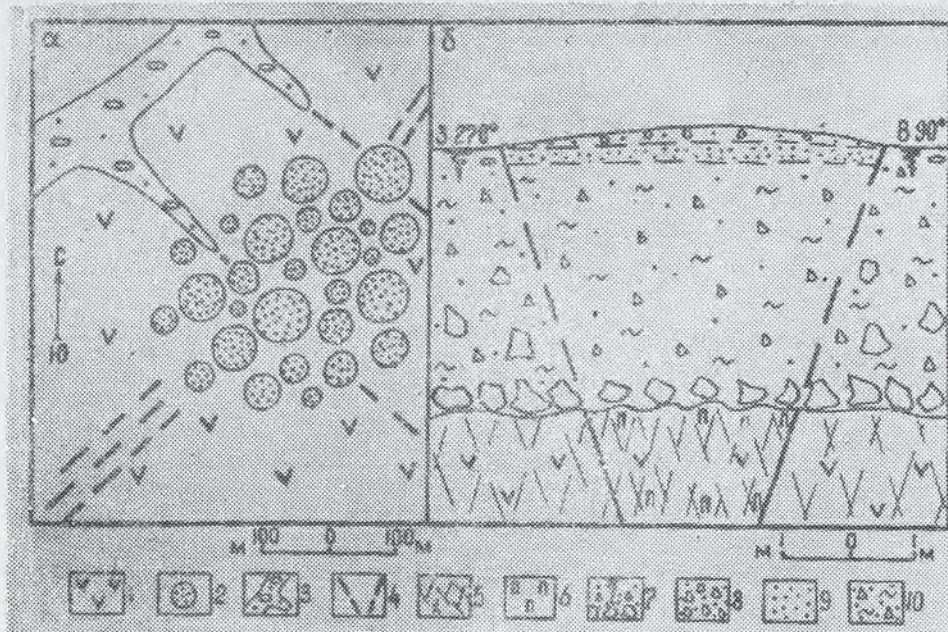


Рис. 1. Схема распределения (а) и внутреннего строения (б) «кругов» красно-бурого глинистого материала.

1 — Лавы и туфы андезито-дацитов. 2 — Круговые неоднородности в аллювиально-делювиальных отложениях второй-третьей надпойменных террас. 3 — Современные аллювиальные отложения. 4 — Тектонические нарушения (разломы). 5 — Система трещин отдельности. 6 — Пропилитизированные породы с наложенным вторичным окварцеванием и гидротермальным выщелачиванием. 7 — Несортированный делювий. 8 — Слой песка и гравия. 9 — Слой почвы и песка. 10 — Слой щебня—гравия—песка—глины.

по того же петрографического состава. Коренные породы внутри образования характеризуются более высокой степенью трещиноватости и гидротермального выщелачивания по сравнению с вмещающими породами, а также обильными водопритоками в горных выработках и топью на поверхности. Их кровля приподнята над поверхностью вмещающих пород на 0,1—0,5 м, а границы подчеркиваются зонами повышенной проницаемости и милонитизации. На аэрофотоснимках они выделяются как кольцевые структурные неоднородности диаметром до 60—80 м, светлым фототонем, четкими линиями ограничения (подчеркиваемыми полосами растительности, отсутствующей внутри неоднородностей), приуроченностью к высоким надпойменным террасам. Видимые закономерности распределения данных образований в поле структур разрушения вулканогенных рудных полей (Рычагов, 1984) не установлены, однако наблюдаются их скопления на участках, тяготеющих к пересечениям радиальных и кольцевых разломов.

Высокая проницаемость гидротермально измененных пород и обилие в них легко выщелачиваемых и выкрашиваемых глинистых минералов и сульфидов железа способствуют более интенсивному криогенному выветриванию этих пород по сравнению с вмещающими. Такой направленный процесс криогенного выветривания приводит к увеличению свободного пространства в гидротермально измененных породах и еще большим напряжениям, вызывающим разрушение пород, что, в свою очередь, ведет к дальнейшему развитию процесса образования морозных полигонов. Вероятно, этим можно объяснить наличие наиболее четкой и сложной (два класса размерности) системы полигонов в аргиллизированных кварцитах, уменьшение ее четкости и сложности (один класс размерности — до 10 м) во вторичных кварцитах и практически

отсутствие полигональных и круглых форм структурных грунтов в пределах пропилитизированных и неизмененных пород.

Таким образом, структурные грунты надпойменных террас, а также оснований склонов и других обводненных участков вулканогенных рудных полей обнаруживают парагенетическую связь с гидротермально измененными породами. Учет этого фактора может в значительной степени помочь делу прогноза гидротермального оруденения на таких, закрытых толщени рыхлых отложений мощностью до 5—10 м и более, участках рудоносных территорий.

Изучение толщи мерзлых пород вулканогенных рудных полей с помощью крупномасштабного электропрофиллирования (работы В. А. Волкова, 1975—76 гг.) позволило выявить зоны с повышенным удельным электрическим сопротивлением. Зоны интерпретировались как кварцевые жилы. Однако горными работами подсечены не кварцевые жилы или другие рудные тела, а трещинно-брекчиевые зоны, представленные в разрезе делювиальных отложений клиньями-лизами льда. Сопоставление плана этих зон (ледяных жил) с тектонической структурой рудных полей (Рычагов, 1984) показало их полную идентичность — ледяные жилы также образуют радиально-концентрическую систему линий. Это дает основание утверждать, что ледяные жилы трассируют тектонические элементы структуры рудных полей. Картирование ледяных клиньев (жил) с помощью электроразведки способствует прогнозированию, выявлению и изучению трещинно-брекчиевой структуры вулканогенных рудных полей. Образование трещин в мерзлых грунтах определяется не только физическим состоянием грунтов, климатическими условиями, мощностью и плотностью снежного покрова и другими экзогенными факторами (Подборный, 1978), но и эндогенными условиями: трещиноватостью горных пород, степени их пористости (текстурой), близостью к зоне глубинного разлома. Корреляция между глубинными (пересекающими толщину мерзлоты) разломами и интенсивностью пучения грунтов и образования ледяных клиньев отмечена также И. Ф. Делеменем (устное сообщение). Интенсивность пучения пород и количество ледяных клиньев возрастают непосредственно над разломами (в зонах разломов).

Под отрицательными формами рельефа, как правило, образуются участки (воронки) протаивания глыбой до нескольких десятков метров (по Сумгину и др., 1940), рис. 2. На участках поверхности Земли, оттаявших по каким-либо причинам, происходит увеличение поглощения потока солнечной радиации по сравнению с фоновым. В результате образуются локальные «тепловые воронки» в слое мерзлых пород (Гречищев и др., 1980). Такие воронки интенсивно пропускают тепло в слой мерзлоты и наблюдается деградация мерзлоты. Начальными условиями увеличения теплового потока и деградации мерзлоты является повышенная тектоническая нарушенность пород конкретных участков и как следствие этого — высокая насыщенность пород водой, а также термокарстовые процессы. Подтверждением этого служат факты обильного водопритока и протаивания мерзлых пород (по данным документации горных выработок и картировочных скважин) на глубину более 5 м, при фоновом протаивании до 1—1,5 м, в зонах сгущения или пересечения тектонических нарушений, открытых трещинно-брекчиевых системах (зонах радиальных разломов Таловской купольно-кольцевой структуры).

В. А. Кудрявцев (1959) показал, что под обводненными понижениями происходит и прогрессивное развитие термокарста (таяние залежей льда) в любых, даже самых суровых климатических условиях: термокарст прогрессирует в своем развитии до полного вытаивания подземных льдов. Термокарст и термоэрозия носят кумулятивный характер — протекают с возрастающей скоростью (Кудрявцев, 1959). Забе-

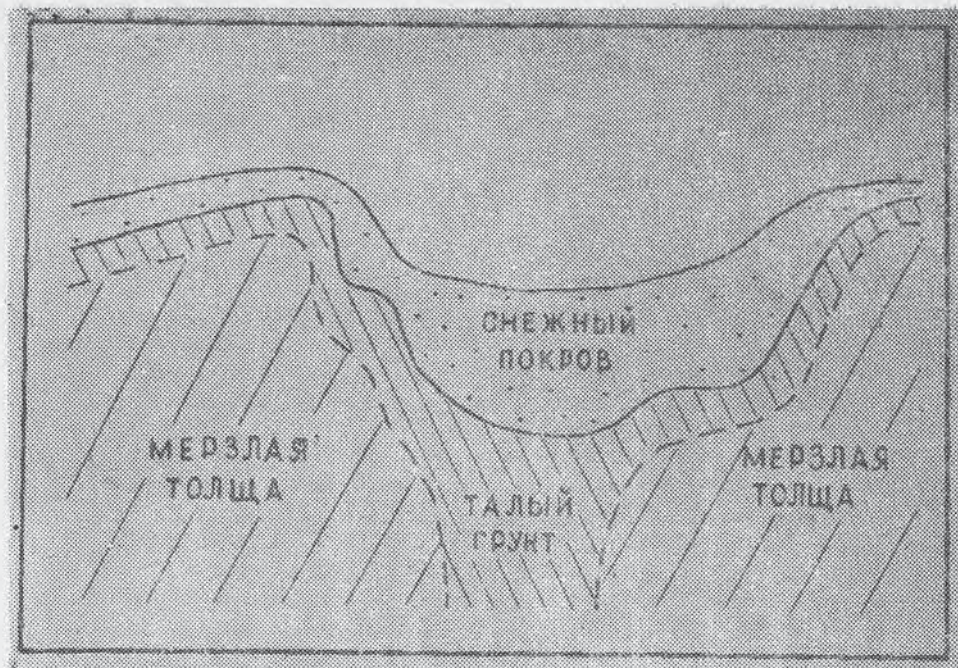


Рис. 2. Схема образования воронок протаивания под отрицательными формами рельефа (по Сумгину и др., 1940).

гая вперед, необходимо отметить, что учет кумулятивного характера термокарста и термоэрозии крайне важен для прогноза состояния мерзлых пород при геоморфологическом и геолого-геофизическом изучении территории, проходке горных выработок, строительстве зданий и сооружений.

Выше уже отмечалось, что рельеф подошвы мерзлого слоя изученной территории представляет собой не плоскую поверхность, а является довольно сложным за счет протаивания мерзлоты снизу на локальных участках (в зонах разломов). Протаивание верхних горизонтов мерзлоты также определяется тектонической нарушенностью пород и тепловые воронки образуются в верхних частях разрывных нарушений, поэтому в зонах разломов происходит образование встречного фронта протаивания (снизу). Возникают «тепловые купола» (рис. 3). Интенсивное кумулятивное развитие этих встречных процессов приведет к образованию сквозных таликовых зон. Следовательно, механизм встречного протаивания объясняет образование сквозных таликовых зон в мерзлых породах. Находит свое объяснение и закономерное расположение озерных котловин, аласов, мочажин и т. п. в радиально-концентрическом каркасе вулcano-тектонических структур (купольных и кольцевых) — в узлах сетки разломов, вытянутость по радиальным или кольцевым направлениям (или по региональным линейным направлениям). На схеме (рис. 4) наблюдается также концентрическое телескопированное или радиальное расположение мочажин в локальных тектонических центрах диаметром 1—2 или более км.

Дистанционные методы картирования форм проявления наиболее распространенных криогенных процессов

На аэрофотоснимках структурные грунты выделяются мозаичной, точечно-пятнистой текстурой изображения, на наиболее крупномас-

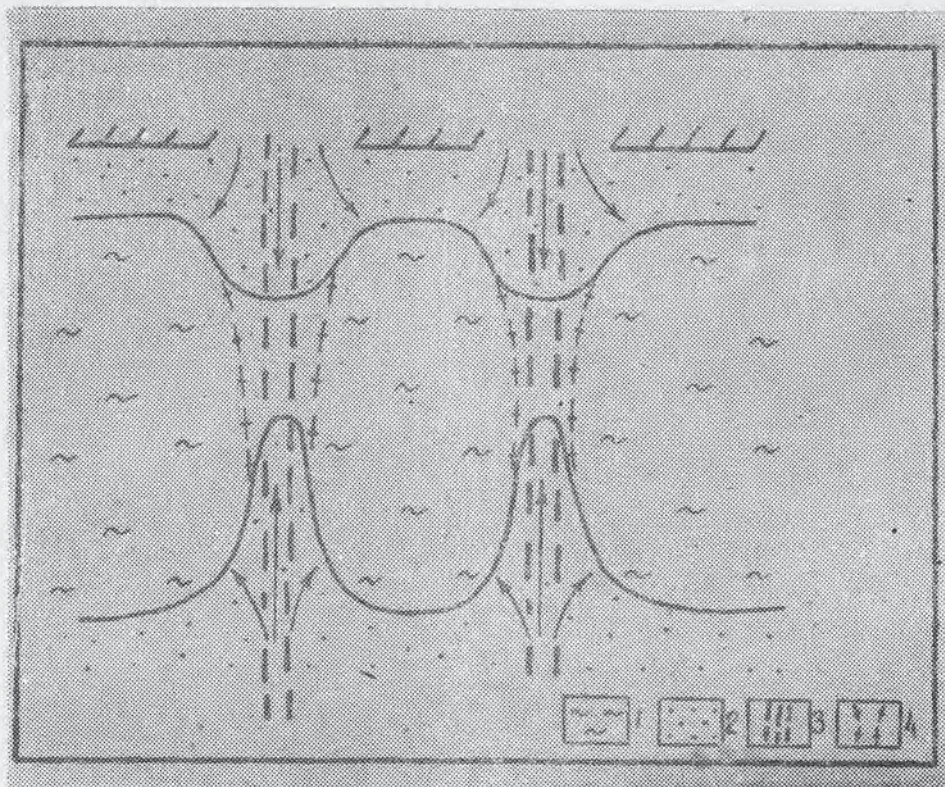


Рис. 3. Схема образования сквозных таликов в зонах разломов (механизм встречного протаивания).

1 — Мерзлые породы. 2 — Талые породы. 3 — Зоны разломов. 4 — Границы блоков мерзлых пород в воронках-трубах протаивания.

Стрелками показаны направления движения теплового потока в зонах интенсивного протаивания мерзлых пород.

штабных снимках различаются как отдельные крупные ячейки, так и вся система пяти-шестигранников или колец. Отличить структурные грунты, парагенетически связанные с тектоническими нарушениями, от грунтов, не обладающих такой связью, на аэрофотоснимках практически нельзя. Однако такую возможность предоставляют радиолокационные снимки. Радиолокационная съемка дает особенно хорошие результаты при дешифрировании тектонических нарушений равнинных территорий, перекрытых чехлом рыхлых осадков большой мощности (Можаева, 1982). Тектонические нарушения на радиолокационных снимках фиксируются сплошными или фрагментарными темно-серыми полосами, точками, пятнами (уменьшением интенсивности радиосигнала). Эти полосы, точки и пятна являются отражением аномальных значений влажности (увеличение до 10 раз), плотности пород (уменьшение на 30—50%), изменения их гранулометрического состава (до суглинка и глины) и мощности (до 5—7 вместо 1—3 м) рыхлых пород, а также более густой растительности в зонах разломов (Можаева, 1982). Изменение отмеченных параметров среды происходит и в мерзлых рыхлых отложениях над тектоническими нарушениями. Радиолокационная съемка хорошо фиксирует сквозные таликовые зоны (таликовые воронки и трубы) по максимальному потемнению изображения, а также закономерному расположению зон в тектонической структуре рудных полей. Наиболее крупные таликовые воронки (диаметром более 100 м), как правило, обнаруживают зональное концентрическое строение: центральная зона выделяется наиболее темным фототонем.

Использование дистанционных методов позволяет переходить непосредственно от наблюдения объекта к прогнозу его параметров и свойств, а также свойств и параметров среды.

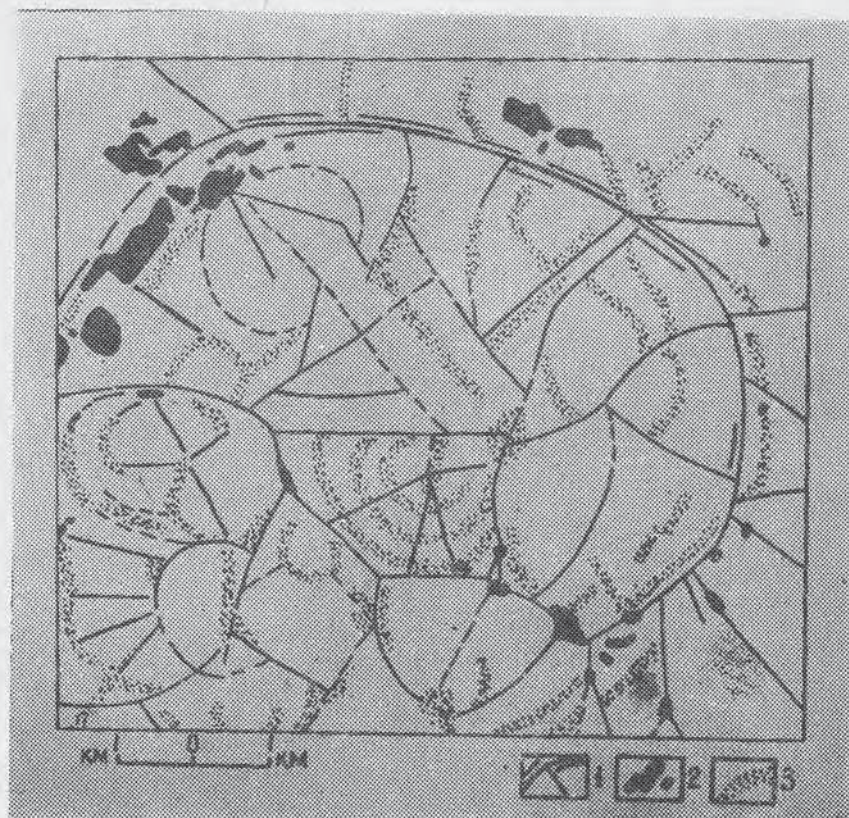


Рис. 4. Схема размещения озерных котловин и заболоченных участков в тектоническом каркасе Айгичкитыпатынской кольцевой вулканоструктуры.

1 — Тектонические нарушения (радиальные, кольцевые и прочие разломы). 2 — Озерные котловины. 3 — Заболоченные участки.

Заключение

В настоящее время в инженерно-геологической практике сложились два основных направления прогнозирования процессов и явлений, происходящих в слое мерзлых пород (Каган, Кривоногова, 1978; Гречищев и др., 1980):

- 1) оценка криогенного строения, состава и свойств льдонасыщенных аллювиальных отложений;
- 2) оценка деформируемости пород и степени ее неравномерности при оттаивании.

Второе направление, по-видимому, предусматривает и прогноз состояния (степени нарушенности и физико-химических изменений) скальных горных пород. До сих пор эта сторона прогнозной оценки мерзлых пород учитывается не в достаточной мере. Помочь решению задачи может анализ полей структур разрушения (фрактур) — см. работы М. М. Василевского и его учеников, 1977—1984 гг. Анализ позволяет количественно оценить степень тектонической нарушенности пород, положение и основные геометрические параметры тектонических (неотектонических в том числе) структур, характер их выполнения (минерализована фрактура или нет). Наиболее проникаемым для подземных и

поверхностных вод являются участки наложения и пересечения фразтур — тектонические узлы или особые зоны и точки (см. рис. 4). Именно к ним приурочены сквозные и поверхностные талики, а также системы морозовоинных трещин и структурные грунты.

При таком подходе объясняется и парагенетическая связь между проявлениями мерзлотных процессов и гидротермально измененными породами и рудами, исходя из того, что гидротермальные изменения развиваются по интенсивно трещиноватым и пористым туфам-лавам кислого-среднего состава, а руды приурочены к участкам-точкам повышенного дробления этих пород.

В последние годы резко возросла роль антропогенного фактора в изменении термического режима мерзлотного слоя. Активное техническое воздействие человека на мерзлые породы при геологоразведочных работах влияет на направленность экзогенных (криогенное выветривание и протаивание) и некоторых эндогенных (изменение гидрогеологического режима и локализация потока подземных вод на определенных участках) процессов. При планировании геологоразведочных работ на вулканогенных рудоносных территориях необходимо также учитывать время антропогенного воздействия на мерзлые горные породы. Все это тем более актуально для районов с незначительной мощностью мерзлоты (Северная Камчатка), где процесс ее деградации в активных вулcano-тектонических структурах (зонах) может протекать очень быстро (в течение нескольких лет или быстрее).

Таким образом, можно утверждать, что существуют парагенетические связи между наиболее распространенными криогенными и некоторыми эндогенными процессами. Криогенное растрескивание грунтов определяется трещинно-брекчиевой структурой вулканогенных рудных полей. Пучение мерзлых грунтов парагенетически связано с тектоническими (неотектоническими) процессами и гидротермально измененными породами. Термокарст развивается по тектонически нарушенным и пористым гидротермально измененным породам в зонах активной фильтрации грунтовых и подземных вод (в структурах разрушения). Для прогнозирования основных параметров криогенных процессов первостепенное значение имеет количественная оценка разрушения пород и степени их физико-химических изменений, а также масштабы и направленность антропогенного воздействия на тепловой режим пород.

Автор благодарен И. Ф. Делемену за чрезвычайно полезное обсуждение основных положений работы и предоставление некоторого оригинального материала, а также В. Н. Виноградову, Ю. М. Стефанову и Я. Д. Муравьеву за критические замечания, способствовавшие написанию окончательного варианта статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Блэк Р. Постоянномерзлые грунты (обзор). — В кн.: Мерзлые горные породы Аляски и Канады. М., Изд-во ИЛ, 1958, с. 7—22.
- Василевский М. М. Структуры разрушения и прогноз рудоносности. М., Наука, 1982, 152 с.
- Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М., Недра, 1980, 383 с.
- Каган А. А., Кривоногова Н. Ф. Многолетнемерзлые скальные породы как объект системного прогнозирования при инженерно-геологических исследованиях. — В кн.: Общее мерзлотоведение. Материалы к III Международной конференции по мерзлотоведению. Новосибирск, Наука, 1978.
- Кудрявцев В. А. О термокарсте. — Вопросы физической географии полярных стран. 1959, вып. 1, с. 101—106.
- Мерзлотно-геологические процессы и палеогеография низменностей Северо-Востока Азии (сб. ст.). Магадан, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1982, 125 с.
- Можаева В. Г. Изучение рельефа по материалам радиолокационной аэро съемки. Л., Недра, 1982, 175 с.

Подборный Е. Е. Вероятностный подход к образованию морозобойных трещин. — В кн.: Общее мерзлотоведение. Материалы к III Международной конференции по мерзлотоведению. Новосибирск, Наука, 1978, с. 156—161.

Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М., Изд-во МГУ, 1967, 304 с.

Рычагов С. Н. Структурный контроль оруденения в Таловской купольно-кольцевой структуре Корякского нагорья (Камчатка). Тихоок. геология, 1984, № 3, с. 74—81.

Рычагов С. Н. Кольцевые структурно-вещественные парагенезисы вулканогенных рудных полей. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984, 150 с.

Сумгин М. И., Качурин С. П., Толстихин Н. И., Тумель В. Ф. Общее мерзлотоведение. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1940, 340 с.