

УДК: 550.34.016

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МАССИВОВ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

© 2024 г. Б. А. Трифонов^{1,*}, С. Ю. Милановский^{1,2,**}, В. В. Несынов¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН,
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*E-mail: igelab@mail.ru

**E-mail: svetmil@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 05.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В статье рассматриваются примеры экспериментальных исследований природно-техногенных изменений свойств многолетнемерзлых пород (ММП) различного состава и строения. Показано, что для контроля изменения свойств ММП, подверженных деградации, особую значимость приобретает геофизический мониторинг состояния грунтового массива. Изложен подход к изучению состояния и свойств грунтов криолитозоны *in situ* на примере комплексных геофизических работ на гидротехнических объектах Западной Якутии, который помогает понять пространственно-временные закономерности развития активных талых зон (талика) за относительно малый интервал времени. На примере Билибинской АЭС, построенной на территории распространения ММП, показано, что упругие свойства скальных мерзлых грунтов, как правило, трещиноватых в верхней части разреза, зависят не только от их петрографического состава, текстуры и структуры, но и от криогенного состояния породы. Для данной промплощадки проанализированы закономерности изменения сейсмических свойств мерзлых скальных грунтов, оттаявших при отепляющем воздействии основных сооружений реакторных блоков за 30-летний период. Показано, что за это время произошло увеличение приращения сейсмической интенсивности в среднем на +0.3 балла относительно первоначальных условий. Изменились соответственно и значения характеристик сейсмических воздействий (пиковые ускорения грунта PGA и величины спектров реакции Sa).

Ключевые слова: криолитозона, мерзлые грунты, геофизические исследования, инженерные сооружения, талик

DOI: 10.31857/S0869780924050087 EDN: QPCNDG

ВВЕДЕНИЕ

Температурный фактор определяет геомеханические и емкостные свойства трещиновато-пористых дисперсных и скальных грунтов криолитозоны. Глобальные и региональные изменения криолитозоны довольно медленны во времени и латерально неоднородны, что затрудняет их оценку. Однако, имеются инженерные объекты (АЭС, водохранилища, объекты ТЭК), которые создают локальную тепловую нагрузку на ММП, меняя их состояние вплоть до талого. Поскольку часть территории криолитозоны сейсмоактивна, очевидно, что и оценка сейсмического отклика при оттаивании ММП актуальна и должна проводиться с учетом геофизической изученности грунтового массива. Ранее был сделан вывод [9, 17, 18], что изменение фазового состава мерзлых пород,

связанное с ростом температуры, должно вызывать существенное изменение их упругих свойств. Известно, что на многих гидротехнических сооружениях Западной Якутии [2, 3, 16, 17, 24] и ТЭЦ в г. Якутск [6] наблюдается развитие неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов, влияющих на штатную эксплуатацию предприятий. Закономерности изменения упругих свойств мерзлых и талых грунтов могут быть установлены с помощью экспериментальных полевых и лабораторных исследований. Для изучения их состояния и внутреннего строения широко применяются геофизические методы. Были рассмотрены примеры с мерзлыми грунтами и расположенными на них инженерными объектами. На основе геофизических и инженерно-геологических данных, имеющихся для этих территорий, строились геосейсмические модели, исходя из представлений об

эффективных сейсмогеокриологических моделях (ЭСМ), подробно рассмотренных в работе [13].

Были проанализированы закономерности изменения сейсмических свойств грунтов криолитозоны под действием техногенных факторов для решения задач сейсмического микрорайонирования (СМР). Рассмотрены примеры геофизических аномалий (тепловых, геоэлектрических, сейсмических) вблизи техногенных объектов, связанные с их отепляющим влиянием на мерзлые породы (водохранилище Сытыкан, каскад Вилюйских ГЭС и территория сооружений Главного корпуса и радиаторных охладителей Билибинской АЭС) [1–3, 16, 17, 24, 25].

Цель исследования — анализ ряда примеров геофизического контроля состояния мерзлых пород, подверженных отепляющему воздействию техногенных объектов.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

Известно, что особое место при анализе теплового воздействия инженерных сооружений на ММП занимают талики природного и техногенного происхождения. Им, в частности, отводится роль триггера в глобальных климатических эволюционных моделях деградации мерзлоты [28]. Талики являются ключевым агентом при региональном и глобальном изменении состояния ММП.

При эксплуатации многих гидротехнических сооружений в зоне распространения ММП (питьевые и гидротехнические водохранилища, хвостохранилища и другие промышленные объекты), существуют проблемы, обусловленные возникновением таликов техногенного происхождения [1–3, 26]. Рассматриваются примеры использования геофизических методов для обнаружения и мониторинга талых зон, приуроченных к гидротехническим сооружениям.

Детальные геофизические исследования [1, 26, 28] показали важную роль таликов природного и техногенного происхождения в ускорении таяния массивов мерзлых пород. Гидрогенные талики техногенного происхождения, с одной стороны, “головная боль” при эксплуатации многих гидротехнических сооружений в зоне ММП, а с другой — уникальные модельные объекты для геофизиков, гидрогеологов и геокриологов.

Наиболее мощное воздействие на тепловой режим мерзлых пород связано с сооружением плотин и созданием искусственных водоемов различного назначения. Старейшая в России ГЭС в зоне распространения ММП — Вилюйская, существует с 1957 г., и на сегодня она входит в комплекс каскада Вилюйских ГЭС-1, 2, 3. Наше внимание

было сосредоточено на изучении талых зон, связанных с береговым примыканием водоемов и плотин гидротехнических сооружений, геофизическими методами [20, 24–26].

Предназначение плотин, включая плотины в зоне многолетней мерзлоты, — сохранение запаса воды при ее контролируемом пропуске. Как показывает практика эксплуатации водохранилищ в зоне ММП такой контроль не всегда удается [20]. Разнообразные противofильтрационные меры (мерзлотные завесы, противofильтрационные мембраны) лишь частично и временно эффективны. В этой ситуации перед геофизическими методами исследования, наряду с задачей выявления и прослеживания таликовых зон, стоит задача опережающего прогноза возникновения и развития талика [15]. Одной из важнейших задач остается контроль гидротехнических сооружений, где центральное место отведено выявлению и мониторингу развития таликовых зон, как связанных с плотинной, так и с береговыми примыканиями [14, 20].

Решение таких задач невозможно без понимания особенностей геофизических полей, обусловленных особенностями геокриологической среды, где развивается фазовый переход “лед–вода” [19]. Ниже приведен пример результатов геофизических наблюдений, характеризующих деградацию мерзлой среды, вмещающей питьевой водоем на р. Сытыкан. Сытыканский гидроузел создан в 1972–1974 г. для водоснабжения г. Удачный и Удачинского горно-обогатительного комбината (УГОКа). В конструктивном отношении плотина гидроузла является насыпной грунтовой, мерзлого типа (проект), водонепроницаемость которой обеспечивается мерзлотной завесой, создаваемой системой термосифонов с принудительным воздушным и жидкостным охлаждением. В 1995 г. в основании плотины зафиксировано развитие фильтрационных таликов, а в последующие годы отмечена резкая активизация их развития с прогрессирующим оттаиванием мерзлого основания плотины (рис. 1). Фильтрация развивалась и в протаявших зонах правобережного примыкания (рис. 2). В 2005 г. по результатам термометрии был зафиксирован прорыв таликом цементационно-мерзлотной завесы.

Пример мониторинга таликовой зоны *in situ* в правобережном примыкании Сытыканского водохранилища [19, 24, 26], сложенного неоднородными трещиноватыми карбонатными породами, разной степени глинистости, с использованием метода односкважинного радиофильтрации на двух частотах (ОРВП) дан на рис. 3. Наряду со снижением эффективных сопротивлений (ρ) в талых зонах, относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ) талых зон многократно выше, чем в мерзлых. Повторные радиоволновые просвечивания (см. рис. 3), дают возможность получить наглядное представление о внутреннем строении

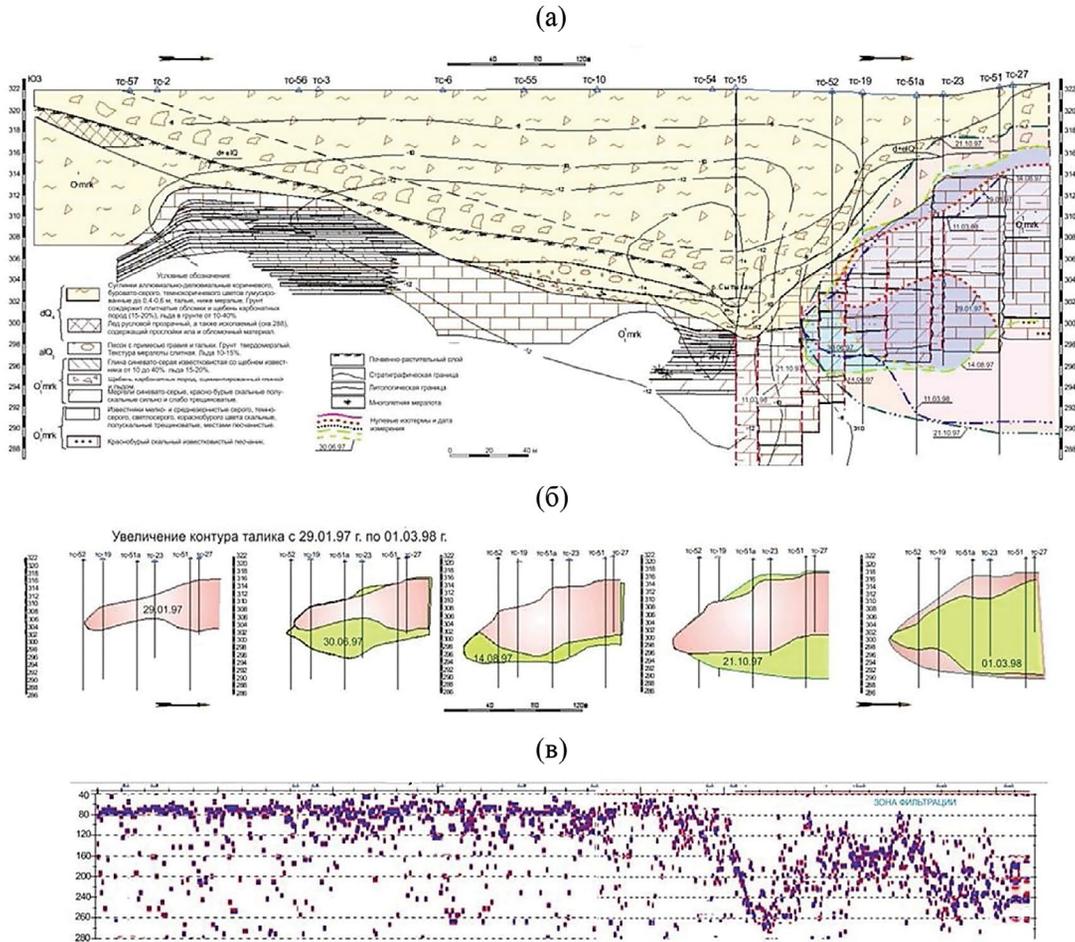


Рис. 1. Геологический разрез (а), нулевые изотермы и динамика изменения контура талика (б), радарограмма (в) по оси Сытыканской плотины, 1997–1998 гг. [1].

техногенного талика в зависимости от динамики его развития и времени года. Интенсивность этих аномалий максимальна в летний период, что отличает их от аномалий, приуроченных к глинистым прослоям. Наблюдается снижение интенсивности обоих параметров (ρ , ϵ) по мере удаления от береговой линии, наиболее заметное в проницаемых зонах. Слоистая структура проводящих, таликовых водонасыщенных зон, отмечаемая в марте, свидетельствует об их сохраняющейся пониженной активности и после зимнего периода.

По результатам электротомографии в сочетании с заливом электролита в пьезометрическую скважину (рис. 4) был выявлен участок повышения электропроводности (временное сечение на 90 мин в районе ПК100), и определены направление и скорость фильтрации, которая составила 288 м/ч, что гораздо выше ожидаемых на этом участке скоростей [2].

Схожая ситуация — развитие техногенного талика, наблюдается в правобережном примыкании старейшего в России гидротехнического сооружения на ММП Вилюйского водохранилища

ВГЭС-1,2 начиная с конца 1996 г. Зарождение обходной фильтрации наблюдалось в прибортовой зоне водосбросного канала, который являлся локальным источником тепла для возникновения проницаемых талых зон в первичномерзлых породах берегового примыкания [2, 3, 20, 24].

Комплекс геофизических методов для изучения зон фильтрации в правобережном примыкании ВГЭС-1,2 включал термометрию, электротомографию, метод естественного поля, геотехнические исследования фильтрационных свойств грунтов, георадиолокационные исследования [2, 3, 24, 26]. Мониторинг межскважинного радиоволнового просвечивания (РВГИ), проводимый ООО “Радионда” и охватывающий период более 20 лет, позволил осуществить опережающий температурный прогноз развития межмерзлотного талика в правобережном примыкании ВГЭС-1,2 [3] (рис. 5).

Эти исследования в последние годы были дополнены регистрацией микросейсм, связанных с работой турбин ВГЭС-1,2 [7]. Анализ результатов измерений амплитуд микросейсмического

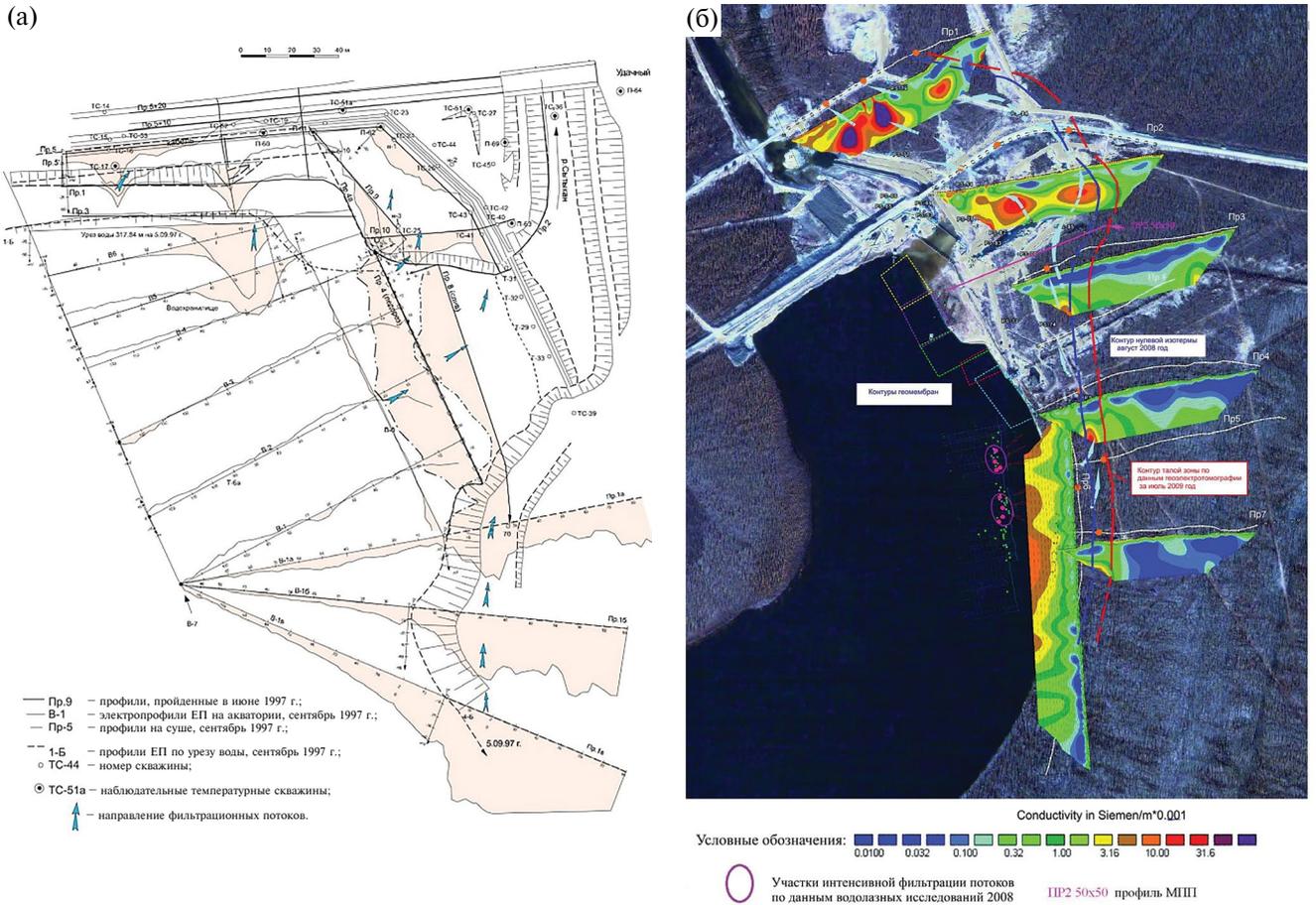


Рис. 2. Сытыканский гидроузел: а - распространение отрицательных аномалий потенциала естественного электрического поля (ЕП) в верхнем бьефе водохранилища; отрицательным аномалиям соответствуют зоны инфильтрации [1]; б - площадной контроль обходной фильтрации в талой зоне правобережного примыкания по совместной интерпретации данных скважинной термометрии и электротомографии [2].

сигнала в скважинах (рис. 6) показал, что для высокоскоростных слоев грунтовых толщ, температура которых ниже нуля (при прочих равных условиях), амплитуда сигнала существенно меньше амплитуды на растепленных низкоскоростных грунтах (разница при этом может составлять 25 дБ и более). Причем наблюдения, сделанные в разное время года (при наличии и отсутствии воды в грунте), позволяют выявлять зоны с аномально высокой амплитудой сигнала в талой части скважины, что дает возможность связать выявленные участки с областями повышенной трещиноватости грунтового массива. Эти области можно объяснить результатом влияния фильтрационных потоков на грунты правобережного примыкания Вилюйской ГЭС-1,2. Отмечено [7], что большая амплитуда сигнала фиксируется в основном в высокочастотной части спектра (110–200 Гц). В то же время наблюдаемые аномалии в мерзлых грунтах меньше по амплитуде (0.7–5.0 дБ), но частотный диапазон немного шире (70–210 Гц). В границах этих областей с учетом данных термометрии можно прогнозировать возникновение негативных инженерно-геокриологических процессов

несмотря на то, что температура грунтов пока еще находится ниже нулевой отметки. Таким образом, как и в случае с радиоволновыми исследованиями, можно говорить об опережающем температурном прогнозе развития талика. Результаты исследований свидетельствуют о сложной внутренней картине взаимодействия вод гидросооружения с трещиноватой мерзлой–талой толщей.

Рассмотренные примеры лишь часть комплексных геофизических работ на гидротехнических объектах Западной Якутии. Тем не менее они помогают понять пространственно-временные закономерности развития активных талых зон за относительно малый интервал времени. Одной из важных особенностей возникновения межмерзлотного активного талика в правобережных примыканиях ВГЭС-1,2 и Сытыкана следует считать наличие локального источника тепла, инициирующего его зарождение (рис. 2, 3) в береговом примыкании. На наш взгляд, таким источником является поток воды через обходной канал, греющий его дно и стенки. В сочетании с гидронапором он способствует прогрессивному

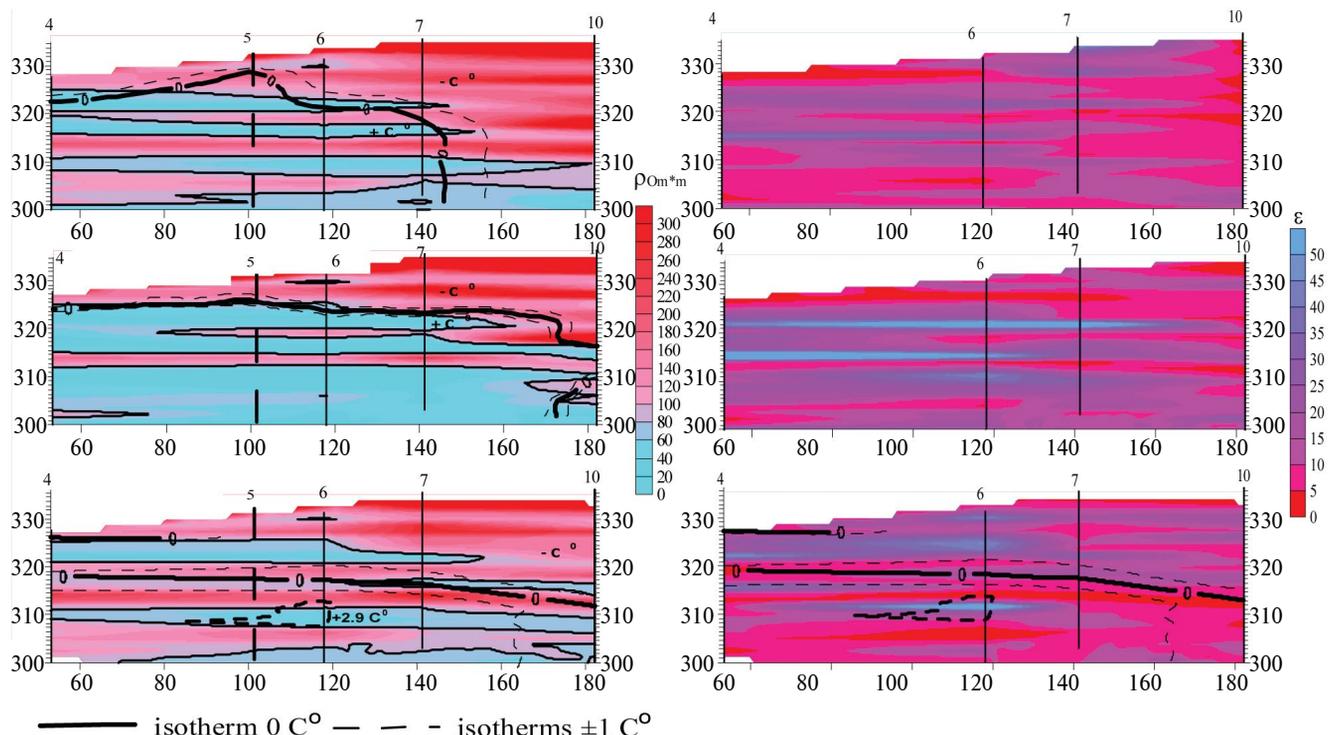


Рис. 3. Примеры геоэлектрических разрезов: слева – эффективных сопротивлений (ρ); справа – относительной диэлектрической проницаемости (ϵ), по профилю скважин (4–5–6–7–10) в мерзлом массиве в крест береговой линии Сытыканского гидроузла (Зап. Якутия); ОРВП наблюдения: вверху – март 2001; в середине – август 2001; внизу – март 2002. Для мерзлых пород характерно высокое ρ и низкое ϵ ; для талых – низкое ρ и высокое ϵ . Уровень дна около плотности 301 м [19, 26]. По горизонтальным осям расстояние от береговой линии, по вертикальным – абсолютные отметки глубины, [м].

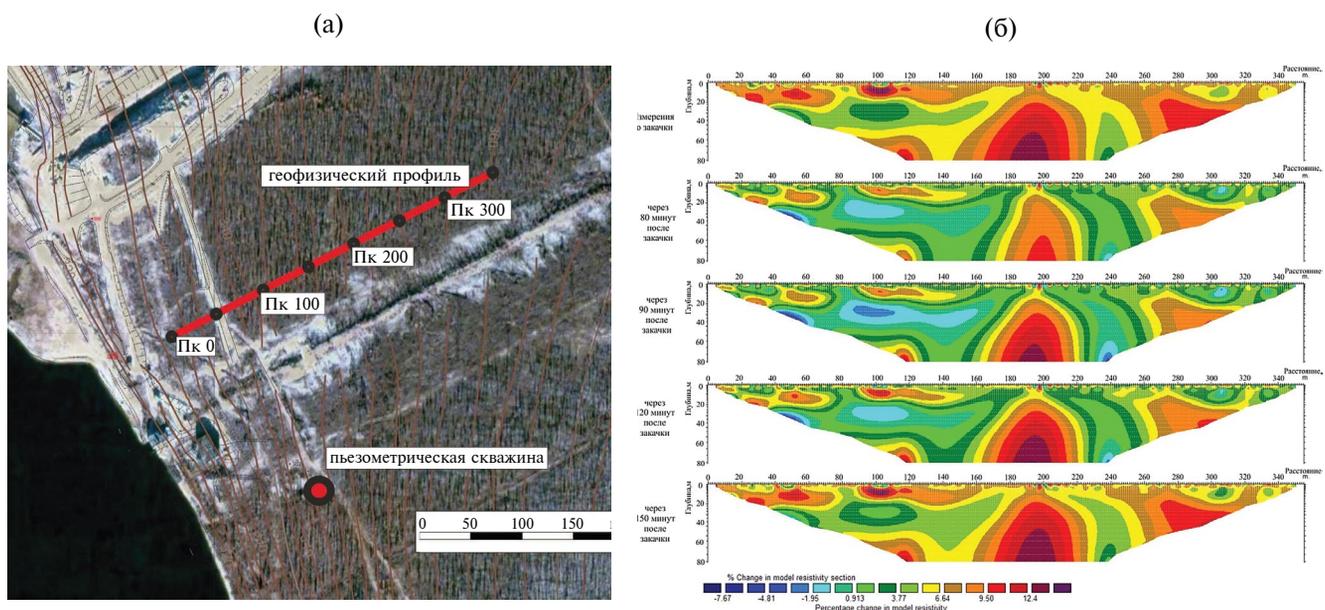


Рис. 4. Схематическое расположение наблюдательного профиля и пьезометрической (закачной) скважины, правобережного примыкания водохранилища Сытыкан, Зап. Якутия (а). Режимные (повторные) электротомографические измерения для выявления фильтрационных окон и скоростей фильтрации. Окно фильтрации на глубине 25 м в районе ПК100м на 90 мин после закачки (б) [2].

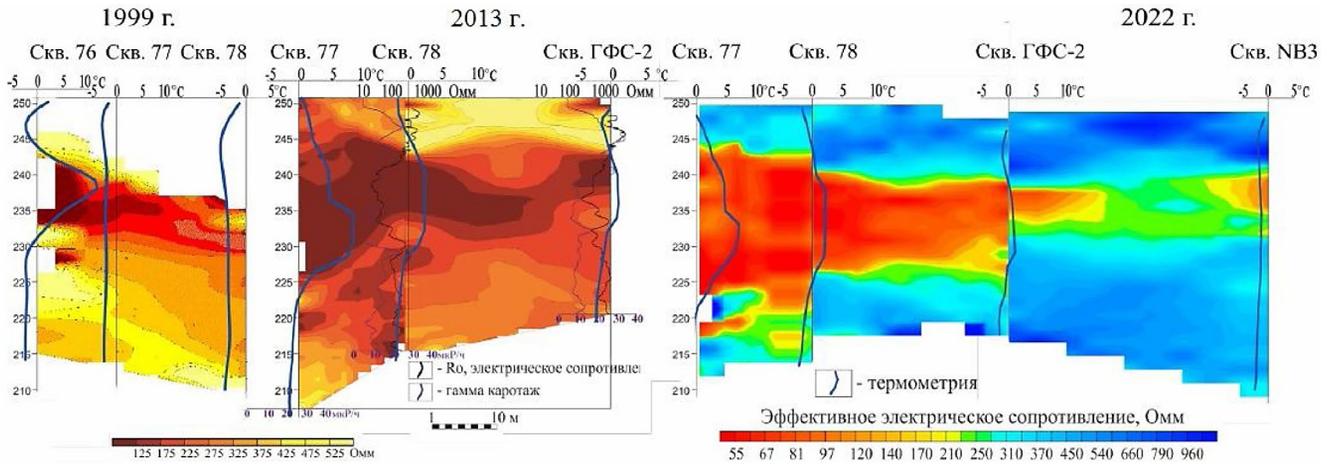


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по результатам РВГИ: 1999–2022 гг. с диаграммами гамма каротажа и электрического сопротивления. Приведена термометрия по скважинам за 1999, 2013 и 2022 г. [3].

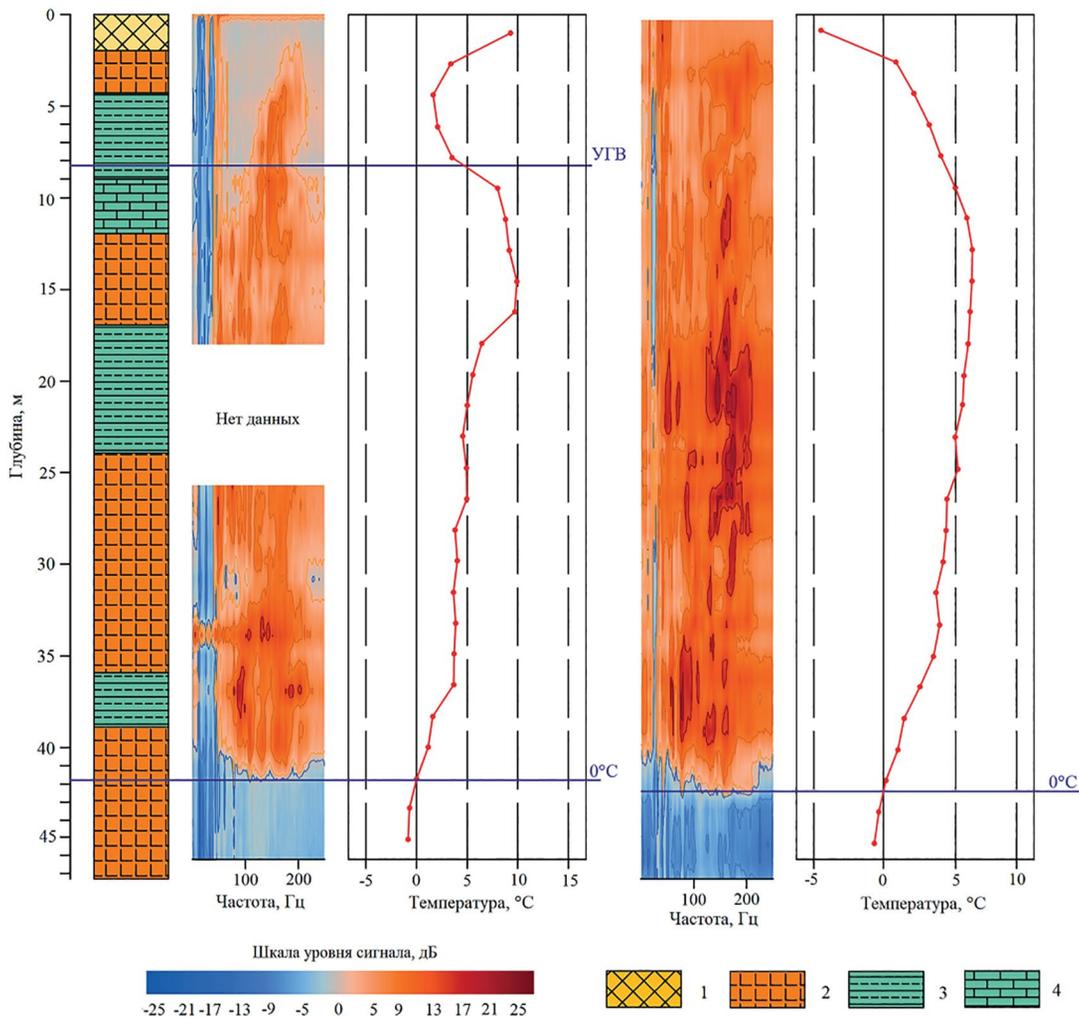


Рис. 6. Результаты измерения амплитуд микросейсмического сигнала и температуры грунтов в скважине NB-5 в 2019 и 2022 г.: 1 — насыпной грунт; 2 — долерит темно-серый, крепкий, сильнотрещиноватый, местами разрушенный до крупного щебня и глыб; 3 — переслаивание алевролитов, песчаников и доломита; 4 — известняк доломитизированный, местами разрушенный до супеси с щебнем и дресвой [7].

развитию талика. Не следует исключать и наличие изначально воздушно-проницаемых мерзлых зон в трещиноватой среде берегового примыкания, связанных с тепловой историей последних.

ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ММП ЧУКОТКИ НА ПРИМЕРЕ БИЛИБИНСКАЯ АЭС (БиАЭС)

Известно, что упругие свойства скальных грунтов зависят от состава, текстуры и структуры, трещиноватости, льдистости и теплового состояния породы [4, 5, 8, 12, 17]. В исследованиях авторов [17] были рассмотрены вопросы, связанные с особенностью проведения СМР на ММП. Было показано, что наличие выветрелой трещиноватой

зоны в мерзлых скальных грунтах и ее обводнение при их оттаивании приводят к заметному изменению сейсмических свойств массива, и как следствие, к различному проявлению сейсмического эффекта. Были проанализированы закономерности изменения сейсмических свойств изначально мерзлых скальных грунтов на промплощадке БиАЭС. За время эксплуатации станции с 1976 г. произошли существенные изменения мерзлотных условий из-за растепления пород под основными сооружениями БиАЭС. При этом в основании тепловыделяющих сооружений (Радиаторный охладитель и Главный корпус) образовалась чаша оттаивания глубиной 30–40 м (1991 г.) (рис. 7).

Территория исследования сложена трещиноватыми скальными породами верхнетриасового возраста, представленными песчаниками,

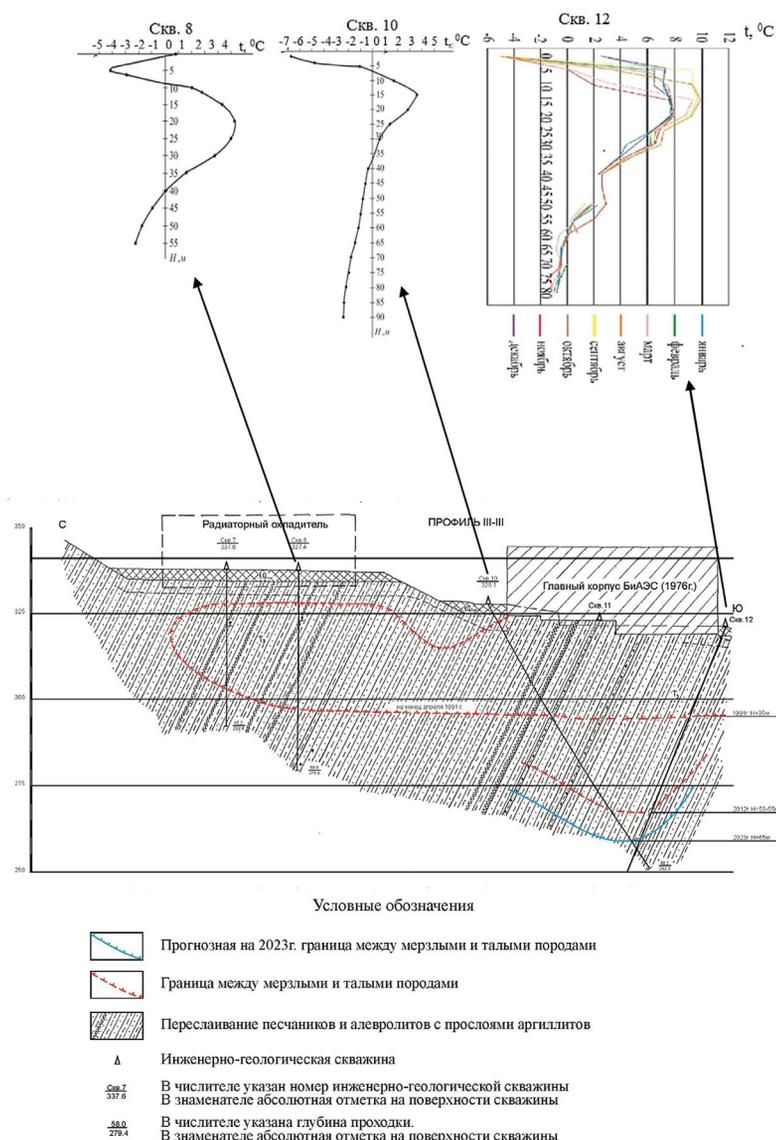


Рис. 7. Пример изменения первоначального состояния мерзлых скальных грунтов по разрезу на промплощадке БиАЭС за время ее эксплуатации с 1976 г. Графики изменения температуры в скв. 8 (предположительно лето, 1991 г.), скв. 10 (предположительно зима, 1991 г.) и скв. 12 (режимные измерения в течение 2012 г.).

Таблица 1. Расчетные геосейсмические модели для грунтовых комплексов при изменении мерзлотных условий под основанием тепловыделяющих сооружений БиАЭС за время ее эксплуатации

Модель 1. Многолетнемерзлая толща пород						Модель 2. Оттаявшая толща пород к 1991 г. на общую глубину 35 м					
№		Vp	Vs	ρ	H, м	№		Vp	Vs	ρ	H, м
1	Насыпные грунты талые в летний период	0.87	0.49	2.1	4	1	Насыпные, древесно-щебенистые грунты	0.87	0.49	2.1	4
2	Многолетнемерзлые триасовые породы: сильнотрещиноватые	3.5	1.95	2.65	31	2	Оттаявшие сильнотрещиноватые триасовые породы	1.95	1.08	2.3	6
3	Многолетнемерзлые триасовые породы: трещиноватые	3.9	2.15	2.65	40	3	Оттаявшие трещиноватые триасовые породы	2.6	1.5	2.65	25
4	Многолетнемерзлые триасовые породы: слаботрещиноватые	4.1	2.3	2.7	∞	4	Многолетнемерзлые слаботрещиноватые триасовые породы	3.7	2.15	2.65	40
						5	Многолетнемерзлые породы	4.1	2.3	2.7	∞
Модель 3. Оттаявшая толща пород к 2012 г. на общую глубину 55 м						Модель 4. Оттаявшая толща пород к 2023 г. на общую глубину 65 м (прогнозная)					
№		Vp	Vs	ρ	H, м	№		Vp	Vs	ρ	H, м
1	Насыпные, древесно-щебенистые грунты	0.87	0.49	2.1	4	1	Насыпные, древесно-щебенистые грунты	0.87	0.49	2.1	4
2	Оттаявшие сильнотрещиноватые триасовые породы	1.95	1.08	2.3	6	2	Оттаявшие сильнотрещиноватые триасовые породы	1.95	1.08	2.3	6
3	Оттаявшие трещиноватые триасовые породы	2.6	1.5	2.65	45	3	Оттаявшие трещиноватые триасовые породы	2.6	1.5	2.65	55
4	Многолетнемерзлые слаботрещиноватые триасовые породы	3.7	2.15	2.65	20	4	Многолетнемерзлые слаботрещиноватые триасовые породы	3.7	2.15	2.65	10
5	Многолетнемерзлые породы	4.1	2.3	2.7	∞	5	Многолетнемерзлые породы	4.1	2.3	2.7	∞

алевролитами и аргиллитами. На рис. 7 приведен геологический разрез по профилю III–III с расположением режимных термометрических скважин (ВНИИОСП, <https://niiosp.ru/ru/>) на участке I очереди АЭС (скв. 7, 8, 10 и 12), последние две скважины – под Главным корпусом АЭС. В скв. 3, расположенной возле Радиаторного охладителя, максимальная температура в 1991 г. составляла +4°C, а в 2012 г. уже +8°C. Чаша оттаивания по данным термометрических скважин, расположенных вблизи Главного корпуса и сооружений Радиаторного охладителя, развивалась во времени, и за 20 лет глубина ее увеличилась примерно на 20 м, т.е. в среднем 1 м в год. Самые последние доступные результаты термометрии относятся к 2012 г. В термометрической скв. 8 глубина оттаивания на 1991 г. составляла 40 м от поверхности под сооружениями Радиаторного охладителя и 30–35 м (скв. 12) под Главным корпусом БиАЭС, а в 2012 г. в скв. 12 глубина оттайки достигла 55 м (см. рис. 7). Необходимо отметить неоднородность интенсивности прогрева пород под

разными сооружениями БиАЭС, а именно, снижение температуры от Главного корпуса реакторного отделения до зоны Радиаторного охладителя, что и определило латеральную неоднородность оттаивания скального основания¹.

В табл. 1 приведено описание расчетных геосейсмических моделей:

- модель 1 для грунтов в мерзлом состоянии;
- модель 2 для отложений в зоне отепляющего техногенного воздействия основных сооружений БиАЭС (Радиаторного охладителя и Главного корпуса) при оттаивании грунтов до глубины 35 м (1991 г.);
- модель 3 для отложений в зоне техногенного воздействия основных сооружений БиАЭС при оттаивании грунтов до глубины 55 м (2012 г.);

¹ Отчет. Билибинская АЭС. I очередь. Реконструкция. Проект. Промплощадка. Технический отчет об инженерно- геологических изысканий по созданию режимной сети. БКИ МО “Атомэнергопроект”, М., 1992.

— модель 4 для отложений в зоне техногенного воздействия основных сооружений БиАЭС при прогнозном оттаивании к 2023 г. до 65 м;

При построении геосейсмических моделей 1–4 основной информацией послужили результаты геолого-геофизических исследований, в том числе скважинной сейсморазведки.

Так как задачей исследований являлось уточнение сейсмических условий площадки БиАЭС с учетом теплового воздействия ее сооружений на многолетнемерзлые скальные грунты, то были проанализированы изменения, произошедшие в мерзлом массиве под БиАЭС за несколько десятков лет ее эксплуатации. Были рассмотрены сейсмические свойства грунтовых комплексов,

где произошло оттаивание ММП за 36 лет существования станции с 1976г. по 2012г. и при прогнозном оттаивании к 2023 г. (модели 2–4), а также участок с сохранившимися в летний период мерзлыми грунтами (модель 1).

По результатам метода МСЖ были получены значения приращения сейсмической интенсивности для участков оттаявших грунтов $\Delta I = +0.28 \div +0.38$ балла при среднем значении $\Delta I = +0.34$ балла.

Возможность частотной избирательности толщи грунтов оценивалась путем расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) с помощью компьютерных программ. Для расчетов АЧХ грунтов использовалась программа SOEF-9, основанная на матричном методе,

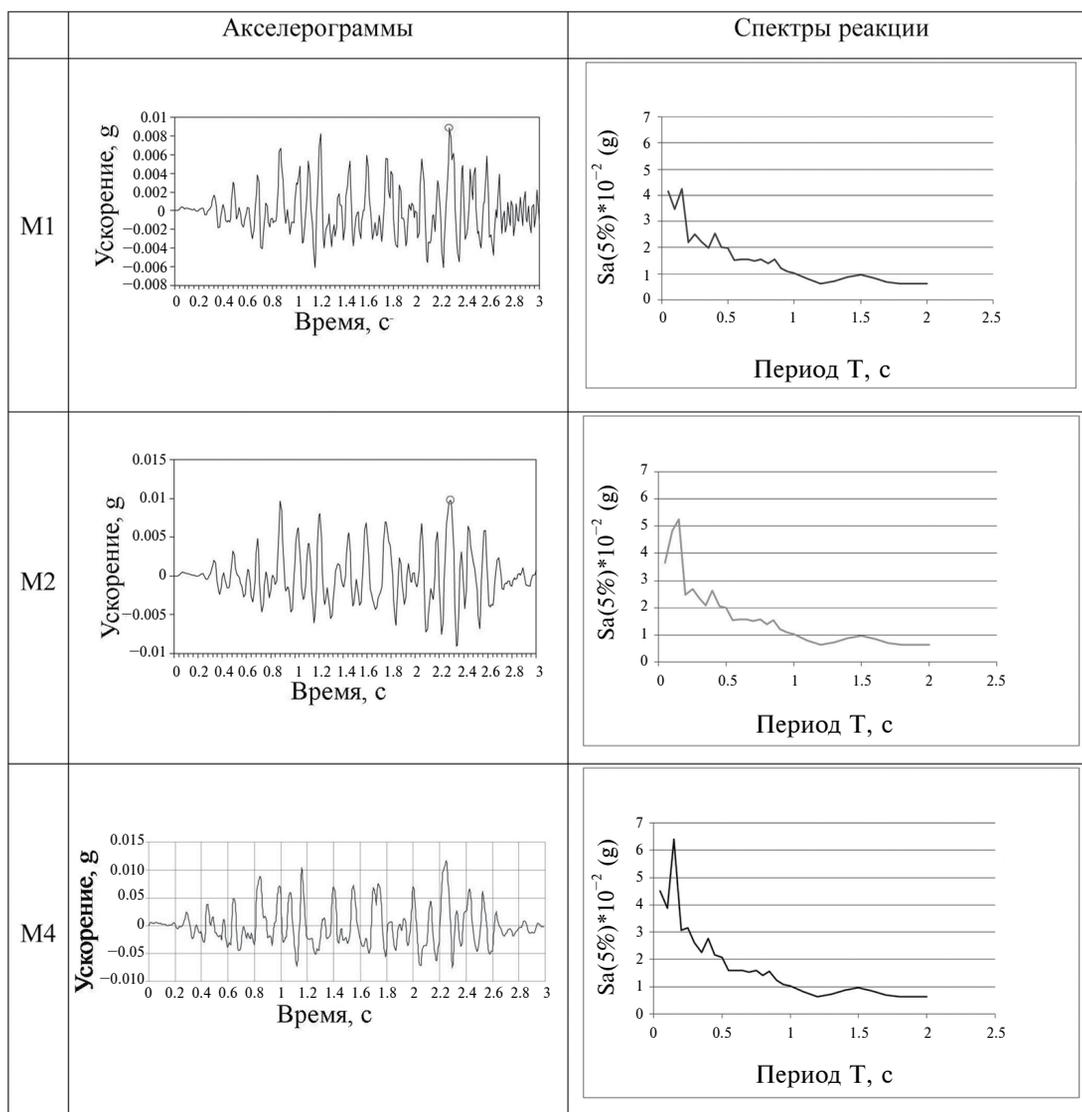


Рис. 8. Примеры расчетных акселерограмм и соответствующих им спектров реакции $S_a(5\%) \cdot 10^{-2}$ в долях g от предполагаемого местного землетрясения: M1 (модель 1) - на поверхности толщи мерзлых скальных пород площадки БиАЭС ($A_{max} = 9.1 \text{ см/с}^2$); M2 (модель 2) - на поверхности оттаявшей толщи скальных пород при общей глубине оттаивания 35 м в 1991 г. ($A_{max} = 10.0 \text{ см/с}^2$); M4 (модель 4-прогнозная) - на поверхности при прогнозной общей глубине оттаивания 65 м к 2023 г. ($A_{max} = 12.0 \text{ см/с}^2$).

разработанная в ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта Л.И. Ратниковой, А.Л. Левшиным [10]. По АЧХ в диапазоне периодов от 0.05 до 0.20 с (частотный состав местных землетрясений) в среднем приращение сейсмической интенсивности на поверхности оттаявших пород до глубины 55–65 м в зоне техногенного влияния основных сооружений относительно участка распространения многолетнемерзлых скальных грунтов оценивается в $\Delta I = +0.25$ балла.

Следующая серия расчетов была проведена по известной программе NERA [21], которая позволила оценить изменение уровня сейсмических колебаний на поверхности оттаявших грунтов, по сравнению с ММП на площадке БиАЭС. Для расчетов была использована акселерограмма, синтезированная для поверхности мерзлого скального грунта по программе PSEQGN [27] с характеристиками местного землетрясения по данным ИФЗ РАН². На рис. 8 приведены фрагменты расчетных акселерограмм и соответствующие им спектры реакции (Sa).

При этом приращение ΔI по расчетному методу СМР (по значениям A_{max}) на поверхности оттаявшей толщи при разных глубинах оттаивания относительно поверхности многолетнемерзлой толщи (модель 1) составили:

$\Delta I = 3.3 \lg (10.01/9.1) \approx +0.16$ баллов (модель 2);

$\Delta I = 3.3 \lg (11.02/9.1) \approx +0.27$ баллов (модель 3);

$\Delta I = 3.3 \lg (12.0/9.1) \approx +0.40$ баллов (модель 4-прогнозная).

По результатам исследований было установлено, что при оттаивании ММП в области отепляющего действия Главного корпуса и Радиаторного охладителя скорости продольных и поперечных волн в зонах трещиноватости скальных пород триасового возраста уменьшаются в 1.40–1.55 раза.

За время эксплуатации станции в основании тепловыделяющих сооружений образовалась чаша оттаивания, максимальная глубина которой к 2012 г. составила 55 м. Значения приращений сейсмической интенсивности (ΔI) на поверхности оттаявшей толщи трещиноватых скальных пород под главным корпусом БиАЭС, рассчитанное по значениям A_{max} в одномерном варианте и диапазоне периодов 0.05÷0.20 с от возможных местных землетрясений, составило относительно кровли многолетнемерзлой толщи $\Delta I = +0.27$ балла и может возрасти до $\Delta I = +0.40$ баллов (при прогнозной глубине оттаивания 65 м к 2023 г.).

Результаты расчетов ΔI по разным методам СМР показали близкие значения (по МСЖ

+0.28 ÷ +0.38 балла, с учетом АЧХ +0.25 баллов, по значениям A_{max} +0.27 ÷ +0.40 балла).

В дальнейшем для уточнения сейсмической реакции латерально неоднородно оттаивающей толщи необходимо использование двух- и трехмерных сейсмологических моделей, как предлагается в работе [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт комплексного геофизического изучения массивов мерзлых пород в зоне гидротехнических сооружений важен, как при оценке упругих характеристик среды и сейсмической опасности этой зоны [11, 18], так и для понимания ее внутреннего строения. Накопленный исследователями за многие годы опыт изучения толщ ММП дает возможность лучше понимать механизмы их эволюции на современном этапе и оценивать деградацию мерзлых толщ в условиях глобального изменения климата.

При исследованиях авторов в 2022–2023 г. [16–18] и анализе материалов прошлых лет [4, 5, 13, 18, 23] рассмотрены закономерности изменения электрических, тепловых и сейсмических свойств различных грунтов, находящихся в мерзлом и талом состоянии. Исследования показывают, что образование талых зон в массиве ММП существенно изменяет в нем характеристики значения удельного электрического сопротивления (ρ), диэлектрическую проницаемость (ϵ) и сейсмического (упругие модули, коэффициенты затухания) полей. Меняются сейсмические условия и характеристики сейсмических воздействий (пиковые значения ускорений (PGA- A_{max}), спектры реакции-отклика (Sa) и кривых динамичности (β)), которые необходимо учитывать при СМР.

Геофизический мониторинг системы “водоем – мерзлый массив – климат”, наряду с мониторингом ММП в естественных условиях, в случае гидротехнических сооружений дает детальное представление о развитии межмерзлотных таликов техногенной природы. Эта информация важна как для разработки прогностических моделей эволюции ММП, подвергающейся техногенному воздействию вблизи крупных инженерных объектов, так и моделей эволюции криосферы в условиях изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойков С.А., Великин С.А., Снегирев А.М. и др.* Изучение фильтрационных таликов в основании грунтовой плотины Сытыканского гидроузла методами инженерной геофизики // Геофизические исследования криолитозоны. М.: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 2000. Вып. 3. С. 58–71.

² Итоговый отчет по теме «Обоснование и уточнение оценок сейсмичности площадки размещения Билибинской АЭС», ИФЗ РАН, М., 2002.

2. *Великин С.А.* Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния основных гидро- и горнотехнических сооружений Якутской алмазной провинции: автореф. дис. ... д. т. н. наук. Якутск, 2020. 43 с.
3. *Великин С.А., Истратов В.А.* Возможности межскважинной радиоволновой геоинтроскопии на примере участка обходной фильтрации правобережного примыкания Вилюйской ГЭС-1 // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посв. 150-летию М.И. Сумгина / Отв. ред. Р.В. Чжан, А.Н. Фёдоров, М.Н. Григорьев. Якутск: Изд-во ИМ им. П.И. Мельникова СО РАН, 2023. С. 238–240.
4. *Воронков О.К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб.: ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2008. 300 с.
5. *Воронков О.К.* Инженерно-сейсмические исследования строения и свойств скальных массивов в области многолетней мерзлоты: автореф. дис. ... д. г.-м.н. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 223 с.
6. *Заболотник П.С., Заболотник С.И.* Состояние грунтов в основании зданий Якутской ТЭЦ. Новосибирск: СО РАН, 2022. 118 с.
7. *Иванов Ю.Г.* Использование микросейсмического сигнала от мощных техногенных источников для исследования состояния грунтового массива во внутренних точках среды // Геотехника. 2022. Т. XIV. № 3. С. 72–82. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-72-82>
8. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / Под ред. А.И. Савича, Б.Д. Куянджича. М.: Недра, 1990. 462 с.
9. *Милановский С.Ю., Трифонов Б.А.* Сейсмические воздействия на мерзлоте в условиях ее деградации // Сб. тез. VII Int. Conf. “Seismology and Engineering Seismology”, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Nationwide Leader Haydar Aliyev. Baku. 2023. С. 38–44.
10. *Ратникова Л.И., Левшин А.Л.* Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред // Физика Земли. 1967. №2. С. 41–53.
11. Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений (к разд. 5 гл. СНИП II-A 12-69). Ленинград: ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 1977. 163 с.
12. *Савич А.И., Яценко З.Г.* Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами / Под ред. А.М. Епинатьевой. М.: Недра, 1979. 214 с.
13. *Седов Б.М.* Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. М.: Наука, 1988. 184 с.
14. *Соболь С.В.* Водохранилища в области вечной мерзлоты. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2007. 161с.
15. *Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А. и др.* Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология. 2022. № 6. С. 141–151. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151>
16. *Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Великин С.А., Истратов В.А.* Сейсмические воздействия на мерзлоте // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посв. 150-летию М. И. Сумгина / Отв. ред.-ры: Р.В. Чжан, А. Н. Фёдоров, М. Н. Григорьев. Якутск: Изд-во ФГБУН ИМ им. П.И. Мельникова СО РАН, 2023. С. 227–229.
17. *Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В.* Особенности проведения сейсмического микрорайонирования на мерзлоте // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 4. С. 106–114.
18. *Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В.* Оценка сейсмических воздействий в условиях деградации мерзлоты // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. Вып. 56. № 4. С. 59–73.
19. *Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.
20. *Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В.* Грунтовые плотины в криолитозоне России. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2019. 427 с.
21. *Bardet J.P., Tobita T.* NERA A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California, April 2001. 44 p.
22. *Emmanuel Chaljub, Emeline Maufroy, Peter Moczo et al.* 3-D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: testing accuracy through stringent models // Geophysical Journal International. 2015. Vol. 201. Issue 1. P. 90–111. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu472>
23. *Istratov, V.A., Frolov, A.D.* Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif // J. Geophys. Res. Planets, 2003. Vol. 108. No E4: 8038–8043. <https://doi.org/10.1029/2002JE001880>
24. *Milanovskiy S., Velikin S., Cherepanov A., Petrunin A., Istratov V.* Permafrost and objects of economic activity in Siberia – risks and facts // Proc. 27th General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics, abstract № IUGG19-0488, Montreal, Canada, 2019. (file:///C:/Users/777/Downloads/abstractDetails_Monreal2019%20(1).pdf).
25. *Milanovskiy S., Velikin S., Petrunin A.* Geophysical Monitoring of Permafrost in Yakutia – Observation and Modelling // Proc. Int. Conf. “Solving the puzzles from Cryosphere”, Pushino, 2019. С. 123–124. <https://istina.msu.ru/publications/article/257939745/>.
26. *Milanovskiy S., Velikin S., Petrunin A., Istratov V.* Geophysical Monitoring of Engineering Constructions in Western Yakutia and Study of Coupled Problem of Temperature and Seepage Fields in Permafrost near Hydro Unit // Proc. of 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference – GeoQuebec, Quebec City, Canada, September 20–23, 2015. 9 p. (https://www.researchgate.net/publication/354447452_Geophysical_Monitoring_of_Engineering_Constructions_in_Western_Yakutia_and_Study_of_Coupled_Problem_of_Temperature_and_Seepage_Fields_in_Permafrost_near_Hydro_Unit)
27. *Ruiz P., Penzien J.* Probabilistic Study of the Behavior of Structures During Earthquake. Report No. UCB/EERC-69-3. (PB 187 886) A06. Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA, March 1969. 45 p.
28. *Parazoo Nicholas C., Charles D. Koven, David Lawrence et al.* Detecting the permafrost carbon feedback: talik formation and increased cold-season respiration as precursors to sink-to-source transitions // The Cryosphere. 2018. V. 12. № 1. P. 123–144. <https://doi.org/10.5194/tc-12-123-2018>.

GEOPHYSICAL METHODS FOR THE STUDY OF NATURAL AND HUMAN-INDUCED CHANGES IN GROUND MASSIFS OF THE PERMAFROST ZONE

B. A. Trifonov^{1,#}, S. Yu. Milanovskii^{1,2,##}, V. V. Nesynov¹

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
B. Gruzinskaya ul. 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia*

[#]*E-mail: igelab@mail.ru*

^{##}*E-mail: svetmil@mail.ru*

The article considers examples of experimental studies of natural and human-induced changes in the properties of cryolithozone with different lithology. Studies have shown that in order to control changes in the properties of an engineering geological section, geophysical monitoring of frozen rocks subject to degradation is of particular importance. An approach to the study of the state and properties of cryolithozone soils *in situ* is presented using the example of complex geophysical work at hydraulic engineering facilities in Western Yakutia, which helps us to understand the spatial and temporal patterns of the development of active thawed zones (taliks) over a relatively short time interval. Using the example of Bilibino NPP, built on permafrost, it is shown that the elastic properties of rocky frozen soils, usually fractured in the upper part of the section, depend not only on lithology, texture and structure, but also on the cryogenic state of rocks. The patterns of changes in the seismic properties of frozen hard rocks at this industrial site were analyzed as a result of the degradation of permafrost under the main structures associated with the heat release of reactor units for more than 30 years. It is shown that under the influence of the warming effect on the rocky frozen ground, the increment of seismic intensity can increase on average to +0.3 points relative to the surface of permafrost (initial conditions). The characteristics of seismic impacts (the values of PGA and the spectrum of the $S_{a_{max}}$ reaction) change accordingly.

Keywords: *cryolithozone, frozen soils and rocks, geophysical research, engineering structures, talik*

REFERENCES

1. Boikov, S.A., Velikin, S.A., Snegirev, A.M., et al. [The study of filtration taliks at the base of the ground dam of Sytykan HPP using engineering geophysics]. In: [Geophysical studies of the cryolithozone]. Moscow, ONTI PNTs RAS Publ., 2000, issue 3, pp. 58–71. (in Russian)
2. Velikin, S.A. [Complex geophysical study of the engineering geocryological state of the foundations of hydropower engineering and mining structures of the Yakut diamond province]. Extended abstract of Dr.Sci. (Techn.) dissertation. Yakutsk, 2020. 43 p. (in Russian)
3. Velikin, S.A., Istratov, V.A. [Possibilities of cross-well radiowave geointrospection by the example of the bypass filtration section of the right-bank junction of the Vilyuiskaya HPP-1]. In: [Sustainability of natural and technical cryolithozone systems in the context of climate change. Proc. All-Russian conference with international participation dedicated to the 150th anniversary of M.I. Sumgin]. R.V. Zhang, A.N. Fedorov, and M.N. Grigoriev, Eds., Yakutsk, 2023, pp. 238–240. (in Russian)
4. Voronkov, O.K. [Engineering seismics in the cryolithozone (study of the structure and properties of frozen and thawed rocks and massifs)]. St. Petersburg. Vedenev VNIIG Publ., 2008, 300 p. (in Russian)
5. Voronkov, O.K. [Engineering and seismic studies of the structure and properties of hard rock massifs in the permafrost zone]. Extended abstract of Dr. Sci. (Geol.–Min.) dissertation. Leningrad, LSU Publ., 1987, 223 p. (in Russian)
6. Zabolotnik, P.S., Zabolotnik, S.I. [The condition of soils and rocks at the base of buildings of the Yakut thermal power plant]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2022, 118 p. (in Russian)
7. Ivanov, Yu.G. [The use of a microseismic signal from powerful man-made sources to study the state of the soil mass at internal points of the medium]. *Geotekhnika*, 2022, vol. XIV, no. 3. pp. 72–82. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-72-82> (in Russian)
8. [Comprehensive engineering and geophysical research in the construction of hydraulic engineering structures]. A.I. Savich, B.D. Kuyundzhic, Eds., Moscow, Nedra Publ., 1990, 462 p. (in Russian)
9. Milanovskii, S.Yu., Trifonov, B.A. [Seismic effects on permafrost in conditions of its degradation] In: [Proc. of the VII Intern. Conf. “Seismology and Engineering Seismology”, dedicated to the 100th anniversary of Nationwide Leader Haydar Aliyev]. 2023, Baku, pp. 38–44. (in Russian)
10. Ratnikova, L.I., Levshin, A.L. [Calculation of spectral characteristics of thin-layered media]. *Fizika Zemli*, 1967, no. 2, pp. 41–53. (in Russian)
11. [Guidelines for accounting for seismic impacts in the design of hydraulic structures (to section 5, chapter of SNiP II-A. 12-69)]. Leningrad, Vedenev VNIIG Publ., 1977, 163 p. (in Russian)
12. Savich, A.I. Yashchenko, Z.G. [Studies of elastic and deformation properties of rocks by seismoacoustic methods]. Epinat'eva A.M., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1979, 214 p. (in Russian)
13. Sedov, B.M. [Seismic studies in the permafrost zone]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 184 p. (in Russian)
14. Sobol, S.V. [Water reservoirs in the permafrost zone]. Nizhny Novgorod, NNGASU Publ., 2007, 161 p. (in Russian)

15. Sudakova, M.S., Brushkov, A.V., Velikin, S.A., *et al.* [Geophysical methods in geocryological monitoring]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Series 4. Geologiya*, 2022, no. 6, pp.141–151. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151> (in Russian)
16. Trifonov, B.A., Milanovskii, S.Yu., Velikin, S.A., Istratov, V.A. [Seismic impacts on permafrost]. In: [Sustainability of natural and technical cryolithozone systems in the context of climate change. Proc. All-Russian conference with international participation dedicated to the 150th anniversary of M.I. Sumgin]. R.V. Zhang, A.N. Fedorov, and M.N. Grigoriev, Eds., Yakutsk, 2023, pp. 227–229. (in Russian)
17. Trifonov, B.A., Milanovskii, S.Yu., Nesynov, V.V. [Peculiarities of seismic microzoning on permafrost]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2023, vol. 50, no. 4, pp. 106–114. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.4-7> (in Russian)
18. Trifonov, B.A., Milanovskii, S.Yu., Nesynov, V.V. [Assessment of seismic impacts in conditions of permafrost degradation]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 2022, issue 56, no. 4, pp. 59–73. (in Russian)
19. Frolov, A.D. [Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice]. Pushchino, ONTI PNC RAS, 2005, 607 p. (in Russian)
20. Zhang, R.V., Velikin, S.A., Kuznetsov, G.I., Kruk, N.V. [Ground dams in the cryolithozone of Russia]. Novosibirsk, Geo Academic Publ., 2019, 427 p. (in Russian)
21. Bardet, J.P., Tobita, T. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California, April 2001. 44 p.
22. Chaljub, E., Maufroy, E., Moczo, P. et al. 3-D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: testing accuracy through stringent models, *Geophysical Journal International*, 2015, vol. 201, issue 1, pp. 90–111. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu472>
23. Istratov, V.A., Frolov, A.D. Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif, *J. Geophys. Res. Planets*, 2003, vol. 108, no. E4, pp. 8038–8043. <https://doi.org/10.1029/2002JE001880>
24. Milanovskiy, S., Velikin, S., Cherepanov, A., Petrunin, A., Istratov, V. Permafrost and objects of economic activity in Siberia – risks and facts. In: Proc. 27th General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics, abstract № IUGG19-0488, Montreal, Canada, 2019 (file:///C:/Users/777/Downloads/abstractDetails_Monreal2019%20(1).pdf)
25. Milanovskiy, S., Velikin, S., Petrunin, A. Geophysical monitoring of permafrost in Yakutia – observation and modeling. In: Proc. Int. Conf. “Solving the puzzles from Cryosphere”, Pushchino, 2019, pp. 123–124. <https://istina.msu.ru/publications/article/257939745/>
26. Milanovskiy, S., Velikin, S., Petrunin, A., Istratov, V. Geophysical monitoring of engineering constructions in Western Yakutia and study of coupled problem of temperature and seepage fields in permafrost near hydro Unit. In: Proc. of 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference (GeoQuebec), Quebec City, Canada, September 20–23, 2015, 9 p. (https://www.researchgate.net/publication/354447452_Geophysical_Monitoring_of_Engineering_Constructions_in_Western_Yakutia_and_Study_of_Coupled_Problem_of_Temperature_and_Seepage_Fields_in_Permafrost_near_Hydro_Unit)
27. Ruiz, P., Penzien, J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquake. Report No. UCB/EERC-69-3. (PB 187 886) A06. Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA, March 1969. 45 p.
28. Parazoo, N.C., Koven, C.D., Lawrence, D. et al. Detecting the permafrost carbon feedback: talik formation and increased cold-season respiration as precursors to sink-to-source transitions, *Cryosphere*, 2018, vol. 12, no. 1, pp.123–144. <https://doi.org/10.5194/tc-12-123-2018>.