

УДК 551.341 + 550.834

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*М. Р. Садуртдинов<sup>1</sup>, А. Г. Скворцов<sup>1</sup>, М. С. Судакова<sup>1,2</sup>, А. М. Царев<sup>1</sup>, Г. В. Малкова<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень*

*E-mail: mr\_sadurtdinov@mail.ru, agskvortsov@mail.ru, Tsarev.am@gmail.com*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва*

*E-mail: m.s.sudakova@yandex.ru*

В Институте криосферы Земли СО РАН разработаны оригинальные методики сейсмических исследований строения, состояния и свойств горных пород. Они нашли применение в научных исследованиях и при решении прикладных задач в криолитозоне и за ее пределами. Для повышения эффективности решения геокриологических задач ведутся исследования по комплексированию сейсмических и георадиолокационных методов.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, георадиолокация, высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах, многоволновая разноазимутальная сейсморазведка, криолитозона, донные сейсмические исследования.

### ВВЕДЕНИЕ

В Институте криосферы Земли СО РАН (ИКЗ СО РАН) разработан ряд оригинальных сейсмических методик, предназначенных для изучения строения, состояния и свойств горных пород. Они могут использоваться как при исследованиях в криолитозоне, так и за ее пределами.

Методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах (ВСПВ) основана на применении отраженных поперечных SH-волн. Наиболее эффективно использовать ее в условиях инверсного скоростного разреза, характеризующегося присутствием высокоскоростного приповерхностного слоя. В области развития многолетнемерзлых пород (ММП) этот тип разреза широко распространен. При таком скоростном разрезе возможно получение разрешенных отраженных волн от геологических границ, залегающих на малой глубине. Методика ВСПВ обеспечивает детальное изучение строения верхней части геокриологического разреза при любом характере изменения скорости сейсмических волн с глубиной.

Методика донных сейсмических исследований разработана для изучения инженерно-геологических и геокриологических условий на

мелководных акваториях и в переходной зоне суша – акватория. При этом используются продольные (P-волны) и поперечные (SH-волны) волны. При обработке данных приоритет отдается SH-волнам. Методика обеспечивает изучение строения сейсмогеологического разреза на мелководных акваториях и идентификацию мерзлого состояния пород по ряду сейсмических критериев.

В последние годы в ИКЗ СО РАН выполняются исследования по рациональному комплексированию сейсмических и георадиолокационных методов для повышения эффективности решения геокриологических задач.

Методика многоволновой разноазимутальной сейсморазведки (МРС) предназначена для мониторинга и пространственно-временного прогнозирования опасных геологических процессов на стадии их подготовки. Она предусматривает измерение ряда сейсмических характеристик – скорости P- и SH-волн, их анизотропии, коэффициента Пуассона, – в пределах исследуемой территории и анализ их пространственно-временной изменчивости. На практике МРС в основном применяется для изучения и прогнозирования склоновых процессов. Она может использоваться для изучения иных природных и техногенных процессов, завершающихся нарушением сплошности горного массива: карстового процесса, определения устойчивости бортов карьеров и др.

Рассматриваемые методики и виды исследований реализуются с помощью любого типа современной сейсмической и георадарной аппаратуры, предназначенной для изучения малых глубин.

### МЕТОДИКА ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ (ВСПВ)

В теории сейсморазведки рассматривается лишь нормальный тип скоростного разреза, при котором скорость с глубиной увеличивается. При таком разрезе в структуре поля всех типов волн присутствуют интенсивные низкоскоростные поверхностные волны. При изучении верхней части разреза (ВЧР), которая является объектом исследования малоглубинной сейсморазведки, эти волны затрудняют или делают невозможным выделение отражений от неглубоких границ. По этой причине при малоглубинных сейсмических исследованиях долгое время применялся только метод преломленных волн (МПВ).

В середине 70-х гг. XX в. во ВСЕГИНГЕО были выполнены исследования, выявившие кардинальное изменение волнового поля SH-волн в условиях инверсного скоростного разреза. Существование такого типа разреза определяется присутствием поверхностного высокоскоростного слоя (Горяинов, Скворцов, 1979; Применение...

1992). Характер этих изменений иллюстрируют данные наземных режимных наблюдений, полученных на одном и том же профиле, до и после появления высокоскоростного слоя сезонного промерзания в летний и зимний периоды соответственно (рис. 1). Образование инверсного скоростного разреза приводит к исчезновению поверхностных волн. Прямая волна становится высокоскоростной и быстро затухающей. В результате в условиях инверсного скоростного разреза возможно проследить несколько разрешенных отраженных SH-волн от неглубоких (до 12 м) границ.

При смене типа скоростного разреза такие изменения происходят только в структуре волнового поля SH-волн, что согласуется с теоретическими представлениями о возникновении поверхностных волн Лява (Боганик, Гурвич, 2006). Несмотря на очевидные разведочные возможности обнаруженного эффекта, первоначально он не был воспринят специалистами и долгое время оставался сейсмической экзотикой.

С появлением цифровой сейсмической аппаратуры для малоглубинных исследований в 80–90-х гг. XX в. во ВСЕГИНГЕО, а затем в ИКЗ СО РАН начались целенаправленные исследования этого явления. Было установлено, что инверсный скоростной разрез широко распространен, а природа высокоскоростного приповерхностного слоя разнообразна (Скворцов, 2005).

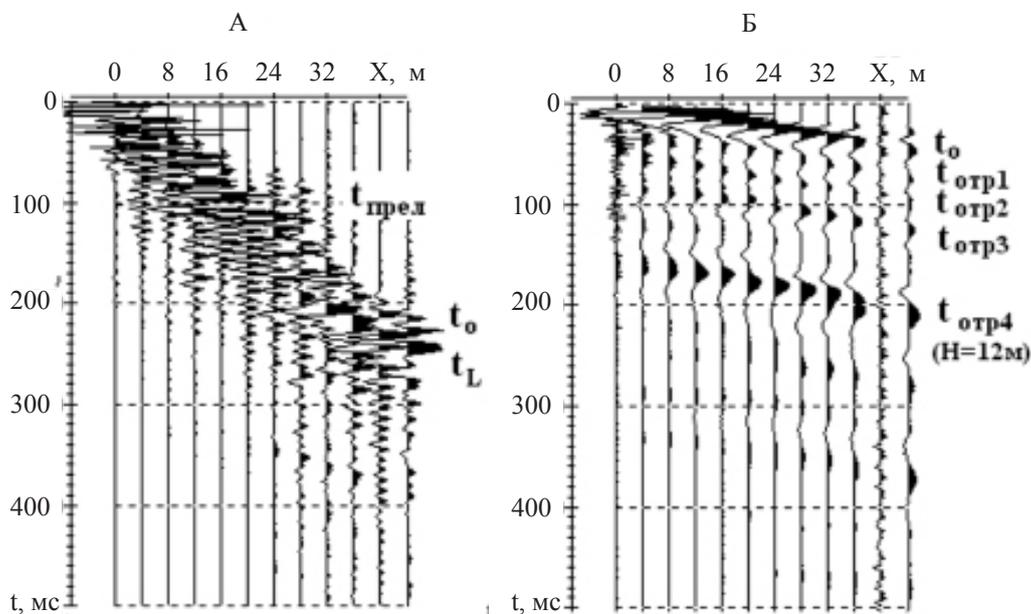


Рис. 1. Результаты наземных режимных сейсмических наблюдений с помощью поперечных SH-волн: А – в условиях нормального скоростного разреза (летний период года), Б – в условиях инверсного скоростного разреза (зимний период года, высокоскоростной поверхностный слой – слой сезонного промерзания).  $t_0$  – прямая волна,  $t_L$  – поверхностная волна Лява,  $t_{\text{прел}}$  – преломленная волна,  $t_{\text{отр1}} - t_{\text{отр4}}$  – отраженные волны

Fig. 1. Near surface seismic results obtained using SH-wave: А – normal velocity conditions (summertime), Б – inverse velocity conditions (wintertime, high-velocity surface layer – seasonally frozen layer).  $t_0$  – direct wave,  $t_L$  – Love wave,  $t_{\text{прел}}$  – refraction wave,  $t_{\text{отр1}} - t_{\text{отр4}}$  – reflected waves

Высокоскоростным поверхностным слоем является слой сезонного промерзания. В пределах криосферы инверсность скоростного разреза может быть обусловлена присутствием в приповерхностной части разреза высокоскоростных литологических разностей, наличием промежуточного слоя вблизи кровли глинистых многолетнемерзлых пород и другими факторами. Инверсный скоростной разреза за пределами криолитозоны возникает при наличии техногенных поверхностных слоев – асфальтовых и бетонных покрытий, уплотненных грунтов и др.

В 1997 г. была предложена классификация скоростных разрезов по степени их инверсности (Скворцов, 1997). Критерием выбрали возможность использования сейсмических волн различных классов для изучения сейсмогеологического разреза при наземных наблюдениях. Были изучены особенности изменения волнового поля в процессе развития инверсного скоростного разреза. Установлено, что кардинальное изменение поля SH-волн возможно и при малой толщине высокоскоростного поверхностного слоя. Она может составлять лишь несколько сантиметров. Степень инверсности скоростного разреза в большей степени зависит от горизонтальных размеров слоя (Snegirev et al., 2003).

Теоретическое и экспериментальное изучение сейсмических волн в условиях инверсных разрезов дало основание ввести понятие зоны больших скоростей (Скворцов, 1998). Были выполнены количественные оценки ее влияния на кинематику отраженных SH-волн. Детальное изучение волнового поля в натуральных условиях наземными и скважинными исследованиями показало возможность и эффективность использования отраженных SH-волн для изучения строения ВЧР. В условиях инверсного скоростного разреза минимальная глубина границ, от которых возможно получение разрешенных SH-волн, составляет 1–5 м; в условиях нормального скоростного разреза – более 15–20 м. Высокая разрешенность SH-волн определяется меньшей, часто существенно меньшей их длиной, по сравнению с Р-волнами. Этому способствует и более простая структура поля SH-волн, обусловленная отсутствием в ее составе обменных волн.

В результате исследований была разработана методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах (ВСПВ) (Скворцов, 2005; Скворцов и др., 2011в). Ее основой являются наземные наблюдения, осуществляемые по технологии многократных перекрытий. Работы выполняются по схеме Y-Y в режиме накопления сигнала. Возбуждение сейсмических колебаний осуществляется ударным способом, как правило,

металлическим или пластмассовым молотком массой 0,5–2 кг. В целях устранения из волнового поля регулярных волн помех, имеющих вектор поляризации в вертикальной плоскости, при накоплении сейсмического сигнала применяется система суммирования сейсмического сигнала с вычитанием. Для этого возбуждение сейсмических колебаний выполняется в двух противоположных направлениях под углом 45° в плоскости, перпендикулярной сейсмическому профилю. При обработке данных сигналы от разнонаправленных ударов вычитаются. Колебания регистрируются одиночными горизонтальными сейсмоприемниками. Шаг между точками наблюдений составлял 1–5 м.

Скважинные наблюдения методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) являются дополнительным видом исследований. Для выполнения ВСП в ИКЗ СО РАН разработаны трехкомпонентные одноточечные сейсмические зонды прижимного типа для исследований в скважинах диаметром от 40 до 400 мм. Цель ВСП – сейсмогеологическая идентификация отраженных волн, зарегистрированных при наземных наблюдениях, и определение скоростного разреза.

Методика ВСПВ опробована в различных сейсмогеологических условиях. Она успешно используется для изучения строения ВЧР до глубины 200–300 м при решении геологических, геокриологических, инженерно-геологических, гидрогеологических и экологических задач.

В области развития ММП методика применяется для изучения естественных и техногенных таликов (Скворцов и др., 2011б), в том числе в городских условиях, непосредственно под домами с проветриваемым подпольем (Snegirev et al., 2003), при выделении в разрезе пластовых льдов (Skvortsov et al., 1992). С ее помощью были проведены поиск и оконтуривание небольших погребенных долин (карста) на глубине около 100 м, являющихся потенциальными источниками алмазных россыпей в Якутии (Скворцов, 2001).

Примером использования методики ВСПВ служат результаты изучения техногенного талика под теплотрассой на территории г. Надым (рис. 2). Наблюдения выполнены во второй половине октября при незначительной мощности слоя сезонного промерзания.

Методика ВСПВ широко используется и за пределами распространения ММП. Целесообразно ее применение в городских условиях, на территориях промышленных предприятий с сооружениями с высоким уровнем помех. Положительный опыт применения методики получен при изучении оползней.

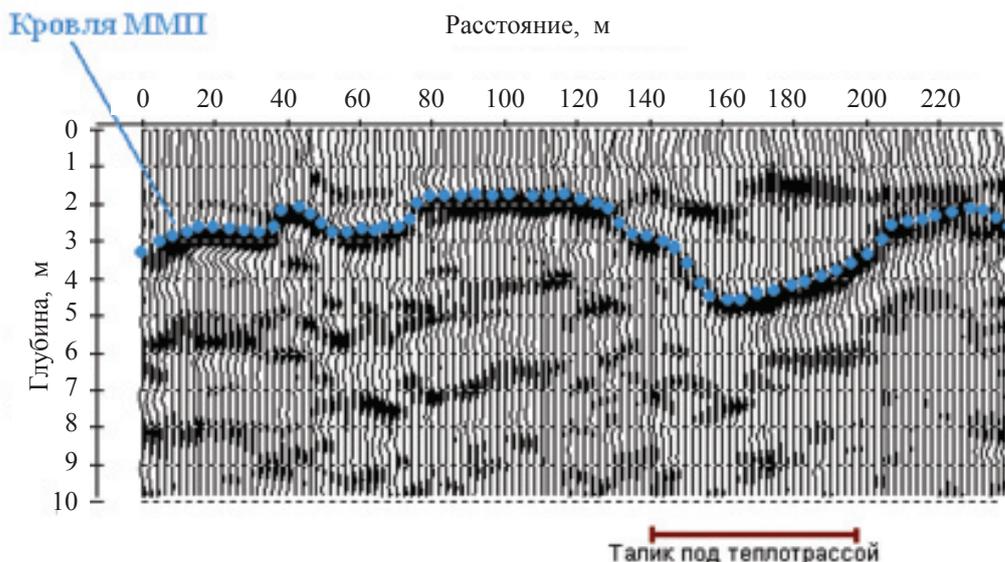


Рис. 2. Техногенный талик под теплотрассой в г. Надым, выделенный по методике ВСПВ

Fig. 2. Technogenic talik under the heating line in the Nadym city obtained by the high resolution SH-wave technique

#### МЕТОДИКА ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

Методику донных сейсмических исследований разрабатывали для изучения инженерно-геокриологических и инженерно-геологических условий в прибрежных частях акваторий и непрерывного прослеживания геологических и геокриологических границ в переходной зоне суша – акватория. Актуальность данной задачи определяется необходимостью знания этих условий для поиска оптимальных инженерных решений при проектировании и строительстве крупных инженерных объектов и их безопасной эксплуатации. Такими объектами, расположенными в прибрежной части шельфа арктических морей, являются морские порты, наземные и подводные трубопроводы и другие сооружения, которые обеспечивают эксплуатацию месторождений углеводородного сырья.

При разработке методики исследованы особенности структуры поля различных типов и классов волн. Было установлено, что в переходной зоне вблизи дневной поверхности, в том числе и в прибрежной части акваторий, практически повсеместно присутствует приповерхностная зона неполного водонасыщения (Скворцов и др., 2011а). Это делает более сложным поле Р-волн. Пространственная невыдержанность этой зоны затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным использование Р-волн для определения строения разреза, выделения кровли ММП и других сейсмогеологических границ.

В отличие от Р-волн SH-волны не реагируют на изменение степени водонасыщения пород.

Это обеспечивает непрерывное прослеживание в разрезе с помощью отраженных и преломленных SH-волн сейсмических границ при переходе от суши к акватории (Sadurtdinov et al., 2015a, б).

При сейсмических исследованиях в криолитозоне существует необходимость выполнения идентификации мерзлого состояния горных пород и сейсмогеокриологических границ. При отсутствии опорных данных о геокриологическом строении разреза, получаемых с помощью бурения, для определения мерзлого состояния пород могут использоваться сейсмические критерии.

Идентификация мерзлого состояния пород и геокриологических границ может быть выполнена по значению скоростей сейсмических волн, по наличию обменной PSP-волны, формирующейся на кровле толщи ММП при регистрации преломленных Р-волн, а также по динамическим особенностям волн. Однако использование этих критериев не всегда дает положительный результат, особенно в разрезах, сложенных глинистыми породами, находящимися в пластично-мерзлом состоянии.

В качестве дополнительного критерия было предложено использовать коэффициент Пуассона ( $\mu$ ), который определяется по соотношению скоростей Р- и S-волн (Садуртдинов, 2013; Скворцов и др., 2014). Показано, что водонасыщенные песчано-глинистые породы при  $\mu > 0,46$ , находятся в талом состоянии, при  $\mu < 0,46$  – в мерзлом.

Для выполнения данного вида исследований разработано донное оборудование, обеспечивающее одновременное возбуждение и регистрацию Р- и SH-волн. Колебания возбуждаются электромагнитным или механическим источником. Принципиально они идентичны. Оба источни-

ка, как и в методике ВСПВ, обеспечивают возбуждение сейсмических колебаний ударами (или серией ударов) в двух противоположных направлениях под углом  $45^\circ$  к поверхности дна. Такая конструкция позволяет одновременно регистрировать Р- и SH-волны, используя сложение или вычитание сигналов от разнонаправленных ударов. Для выполнения донных наблюдений со льда разработан специальный сейсмический источник, действующий по такому же принципу. Регистрация колебания осуществляется косой донных устройств. В каждом устройстве размещены два сейсмоприемника для приема Р- и SH-волн.

Опыт донных сейсмических исследований в различных геологических и геокриологических условиях приведен в работе (Мельников и др., 2010; Sadurtdinov et al., 2015a, б и др.). Результаты донных работ зимой изложены в статье (Садуртдинов и др., 2015 и др.)

Методика донных сейсмических исследований использовалась при выполнении производственных работ для изучения геокриологических условий в баровой части р. Индигирка и прибрежной части Обской губы. Она применялась при выполнении скважинных исследований со льда на р. Амур для целей сейсмического микрорайонирования на участке проектируемого моста в г. Благовещенске.

## ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Георадиолокация в благоприятных инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условиях является эффективным, мобильным и относительно дешевым инструментом изучения верхних горизонтов геологической среды. В последние годы в ИКЗ СО РАН выполняются исследования по оптимизации метода георадиолокации для изучения геокриологических условий и рационального комплексирования его с сейсмическими методами.

Основной объем георадиолокационных исследований выполняется по методике непрерывного профилирования с совмещенными приемной и излучающей антеннами. В этом случае скорость распространения электромагнитных волн, необходимая для определения глубины отражающих границ и построения глубинных разрезов, устанавливается по годографам дифрагированных волн от локальных неоднородностей в геологическом разрезе. Эти волны – «гиперболы дифракции» (Старовойтов, 2008) – статистически распределены в разрезе или могут отсутствовать вовсе. В результате для определения глубины границ используется среднее значение скорости, вычисленное по параметрам дифракционных волн, или значение скорости, взятое из

априорных данных или справочников. Это ведет к ошибкам в определении глубин отражающих границ, особенно в случае неоднородного разреза с меняющимися по горизонтали и вертикали физическими свойствами – влажностью, засоленностью и др., влияющими на скорость электромагнитных волн.

Для устранения этого недостатка в ИКЗ СО РАН большое внимание уделяется использованию и совершенствованию методики зондирования, при которой одна антенна находится неподвижно на пикете профиля, а вторая перемещается вдоль профиля. Использование методики зондирования позволяет детально и достоверно определять скорости электромагнитных волн в разрезе, а значит, и глубины искомых границ и объектов. Информация о пространственной изменчивости скорости электромагнитных волн обеспечивает детальное расчленение разреза на литологические разности, выделение геокриологических границ, расчет объемной влажности по имеющимся в литературе корреляционным зависимостям (Владов, Судакова, 2017).

При использовании георадиолокации возникают также трудности с однозначным определением геологической природы регистрируемых границ. Работами ИКЗ СО РАН показано, что они могут быть устранены путем комплексирования сейсмических и георадиолокационных исследований. При этом сейсмические исследования рассматриваются в качестве опорного метода, который позволяет однозначно идентифицировать природу ряда границ (кровля ММП, уровень грунтовых вод), а георадиолокационные обеспечивают получение массового объема информации. Пример комплексного использования этих методов для изучения геокриологических условий в прибрежной части о. Кашин в Печорской губе показан на рис. 3.

Сейсмические исследования были выполнены в 2011 г. (Садуртдинов, 2013; Sadurtdinov et al., 2015б). С помощью преломленных SH-волн на острове и в прибрежной части акватории была выделена сейсмическая граница, которая по сейсмическим критериям соответствует кровле ММП. По полученным данным ММП в пределах акватории присутствуют лишь на удалении 170 м от берега. Это подтверждается результатами, полученными с помощью отраженных Р-волн.

В последние годы в ИКЗ СО РАН выполняются исследования по оптимизации метода георадиолокации для изучения геокриологических условий и рационального комплексирования его с сейсмическими методами (Садуртдинов и др., 2016; Судакова и др., 2017; Sadurtdinov et al., 2016). В 2016 г. в центральной части этого профиля осуществили георадиолокационные исследования по методике непрерывного профи-

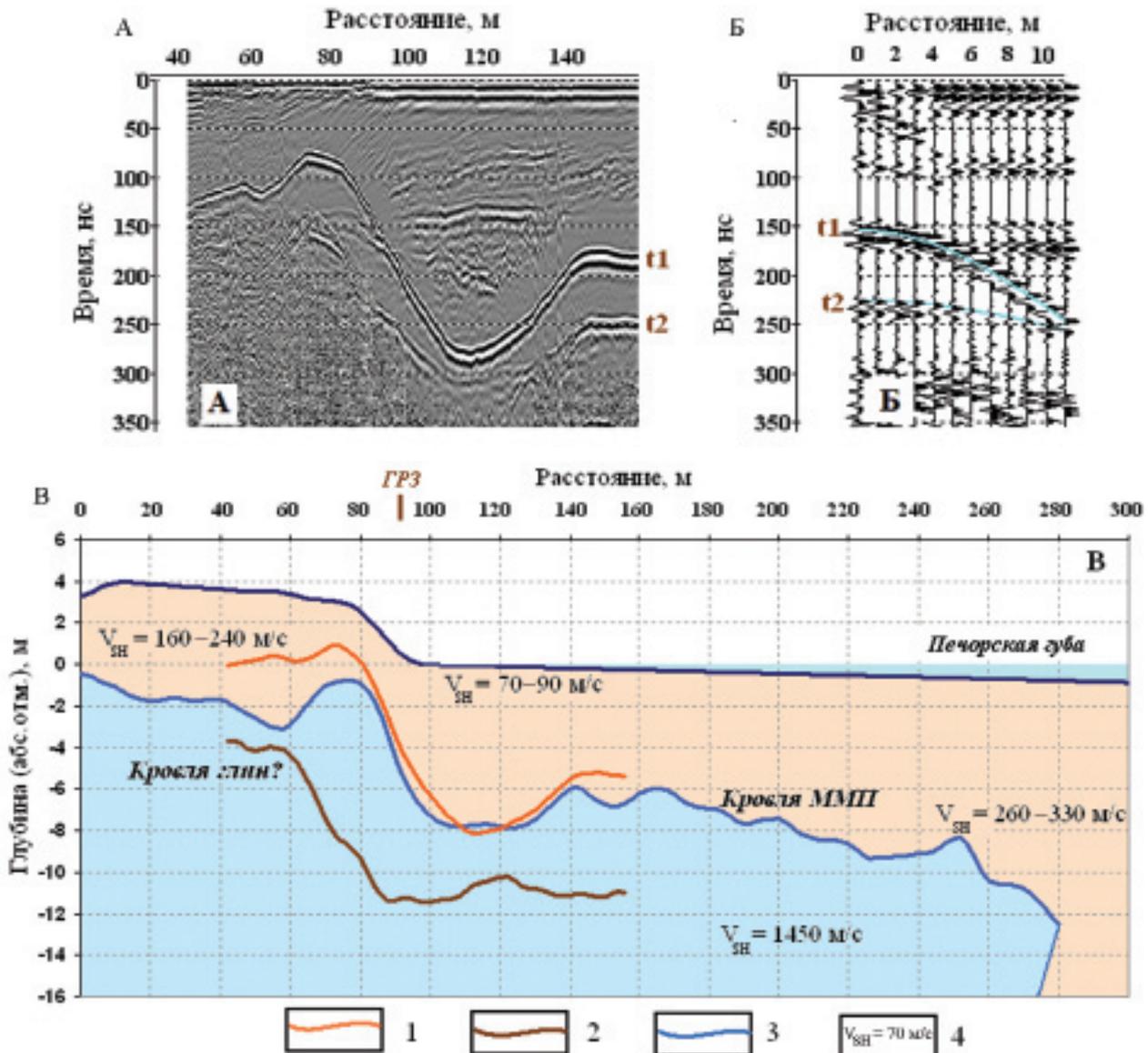


Рис. 3. Результаты комплексных геофизических исследований в прибрежной части о. Кашин в Печорской губе: А – временной георадиолокационный разрез; Б – результаты георадиолокационного зондирования в пределах пляжа; В – геолого-геофизический разрез;  $t_1$  и  $t_2$  – отраженные электромагнитные волны от кровли ММП и кровли мерзлых глин; 1, 2 – кровля ММП и кровля мерзлых глин по данным георадиолокационных исследований; 3 – кровля ММП по данным сейсмических исследований с помощью преломленных поперечных SH-волн; 4 – значение скорости SH-волн, ГРЗ – точка георадиолокационного зондирования

Fig. 3. Results of complex geophysical investigation in the coastal area of Kashin Island (the Pechora Bay): А – GPR cross-section; Б – multiple offset GPR data on the beach; В – geology-geophysical cross-section;  $t_1$  and  $t_2$  – electromagnetic waves reflected from permafrost table and frozen clay table. 1, 2 – permafrost table and frozen clay table observed by GPR; 3 – permafrost table observed by refracted SH-wave; 4 – SH-wave velocity value, ГРЗ – point of multiple offset GPR observation

лирования. На временном разрезе выделен ряд отражающих границ. Дифракционные волны практически отсутствуют. С помощью георадиолокационного зондирования на пляже были определены скорости отраженных волн  $t_1$  и  $t_2$ . Это позволило установить положение отражающих границ в разрезе.

Первая граница соответствует кровле ММП. На акватории и пляже положение в разрезе сейсмической и георадиолокационной границ идентично.

На берегу сейсмическая граница залегает на 2–3 м глубже. Это связано с изменением скорости электромагнитных волн в результате изменения геологического разреза. По геологическим данным вторая георадиолокационная граница соответствует кровле глин в толще ММП.

На рис. 4 показаны результаты изучения особенностей залегания торфов вблизи Нарьян-Мара с помощью георадарных исследова-

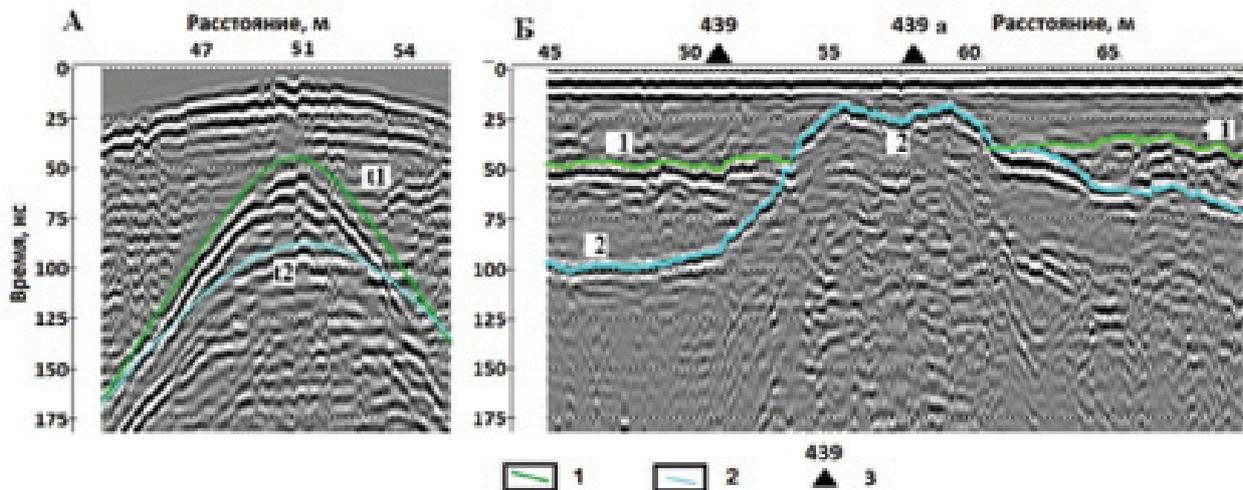


Рис. 4. Результаты георадиолокационного зондирования с неподвижной приемной антенной (А) и георадиолокационного профилирования с совмещенными приемной и излучающей антеннами (Б), полученные в районе г. Нарьян-Мар.  $t_1$  – отраженная волна от подошвы торфа,  $t_2$  – отраженная волна от кровли ММП. 1 – подошва торфа, 2 – кровля ММП, 3 – инженерно-геологическая скважина и ее номер

Fig. 4. GPR results. Multiple offset GPR data (А) and of GPR profiling data (Б) obtained near Naryan-Mar city.  $t_1$  – wave reflected from the turf floor,  $t_2$  – wave reflected from the permafrost table. 1 – turf floor, 2 – upper part of permafrost, 3 – geological borehole and its number

ний. Здесь на временном разрезе также отсутствуют дифрагированные волны. Изучение скоростного разреза выполняли с помощью георадиолокационного зондирования. Достоверность положения в разрезе выделенных границ и их геологическая природа подтверждены бурением.

#### МЕТОДИКА МНОВОВОЛНОВОЙ РАЗНОАЗИМУТАЛЬНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ (МРС)

Методика МРС разработана для изучения и мониторинга напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в процессе развития экзогенных процессов, в том числе и на стадии их подготовки (Скворцов и др., 2006). В настоящее время она в основном используется для изучения опасных склоновых процессов (Скворцов и др., 2008).

Методика основана на теоретических и экспериментальных зависимостях сейсмических характеристик от напряженно-деформированного состояния грунтового массива и прочности пород (Горяинов и др., 1987). В МРС определяют скорости продольных  $V_P$  и поперечных  $V_{SH}$  волн, их анизотропия  $K_{ан}$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ . Изучение пространственно-временного распределения сейсмических характеристик обеспечивает фиксацию и мониторинг особенностей напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в целях прогнозирования их устойчивости. При анализе полученных результатов принимается, что зоны пониженных значений скоростей сей-

смических волн соответствуют участкам массива с меньшим запасом прочности пород – ослабленным зонам (Скворцов, 1988). Зоны с  $K_{ан} < 1$  соответствуют зонам растяжения, в пределах которых при развитии геологических процессов возможны нарушения сплошности горного массива. При изучении склоновых процессов для определения  $K_{ан}$  измеряют скорости в двух направлениях, соответствующих главным напряжениям – по падению и простиранию склона.

Коэффициент Пуассона, определяющийся соотношением скоростей Р- и S-волн, является показателем того, как далеко исследуемая часть горного массива находится от предельного состояния. Эта характеристика может служить количественным показателем для пространственного и временного прогнозирования устойчивости грунтового массива, а также для определения типа предстоящего нарушения его сплошности. При готовящемся хрупком разрушении при достижении предельного состояния в областях предстоящего разрушения массива коэффициент Пуассона приближается к  $\mu = 0$ ; в случае предстоящего пластического разрушения – к  $\mu = 0,5$  (Скворцов и др., 2006).

Технологически МРС может быть реализована с помощью наземных, наземно-скважинных и скважинных наблюдений. Наиболее простым и эффективным способом реализации является технология сейсмического профилирования на постоянной базе (СППБ). Она обеспечивает детальное изучение планового распределения сейсмических характеристик в приповерхностной части геологического разреза. Локализация изме-

рений здесь целесообразна и эффективна как с физической, так и с методической точек зрения (Горяинов и др., 1987).

Ниже приводятся результаты МРС, полученные в 2015 г. на геокриологическом стационаре Марре-Сале (западное побережье п-ова Ямал, устье р. Марре-Яха). Участок исследований располагался на останце коренного морского берега, ограниченного с запада береговым уступом высотой до 30 м, а с востока – оврагом (рис. 5).

При выборе наблюдательной площадки (на рисунке околнурена прямоугольником) исходили из того, что на массив горных пород оказывают влияние два склоновых процесса. На западе площадка подвергается воздействию от разрушения и оползания береговых уступов. На востоке источником динамического воздействия на объект являются оползневые процессы в бортах оврага.

Исследования выполнены на пяти сейсмических профилях широтного направления. База измерений равнялась 2 м, что позволяло определять скорости только в сезонно-талом слое (СТС). Шаг наблюдений составлял 1 м. Ско-

рость Р- и SH-волн измерялась вдоль и поперек профилей.

Карты распределения коэффициента анизотропии SH-волн и коэффициента Пуассона показаны на рис. 6. Первый показатель определялся как отношение скорости SH-волн, измеренной вдоль и поперек профиля в точке наблюдения, второй – из соотношения скоростей Р- и SH-волн, измеренных вдоль профиля.

Карта коэффициента  $K_{ан}$  показывает, что почти весь грунтовый массив находится в состоянии растяжения под воздействием склоновых процессов. На карте выделяются 4 зоны растяжения, которые выделены и на карте анизотропии Р-волн, что подтверждает достоверность полученных данных. Ближайшая к береговому уступу ось зоны растяжения по форме и размеру практически идентична кромке отделившегося ранее оползневому блоку, расположенного севернее наблюдательной площадки (см. рис. 5). Это дает основание считать, что указанная ось соответствует выходу на дневную поверхность формирующейся поверхности смещения нового оползневому блоку.

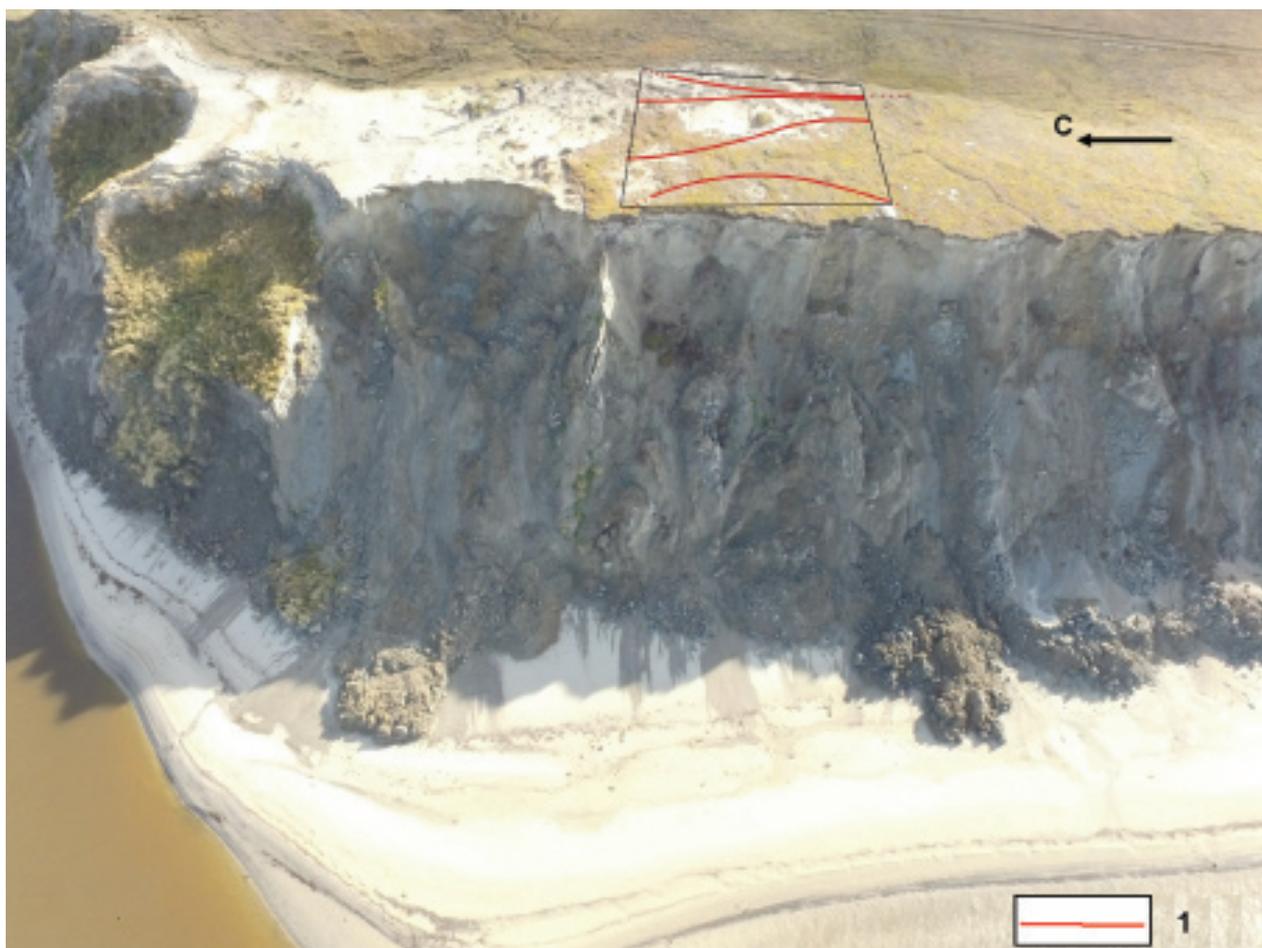


Рис. 5. Общий вид на площадку в устье р. Марре-Яха на западном побережье Ямала (геокриологический стационар Марре-Сале, фото 2016 г.): 1 – оси зон растяжения по данным полевых наблюдений

Fig. 5. General view of the site at the Marre-Yakha river estuary on the western coast of Yamal (Marre-Sale key-site, photo taken in 2016): 1 – axes of stretching zones obtained by field research

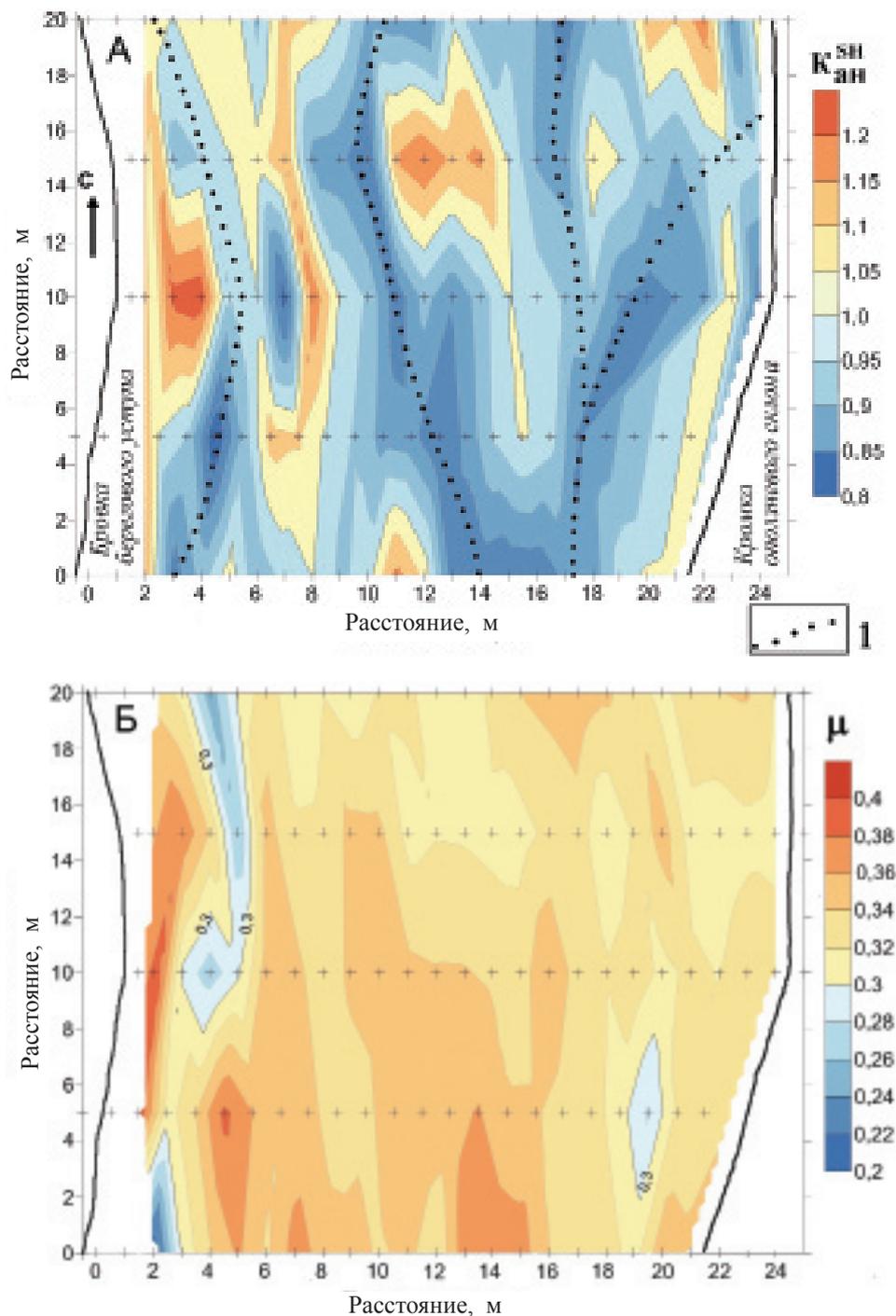


Рис. 6. Результаты исследований по методике МРС на геокриологическом стационаре Марре-Сале (западное побережье Ямала, в устье р. Марре-Яха): А – карта коэффициента анизотропии поперечных SH-волн, Б – карта коэффициента Пуассона, 1 – оси растяжения по данным полевых наблюдений

Fig. 6. Multiply multi-azimuth seismic results obtained at the Marre-Sale key-site (western coast of Yamal, Marre-Yakha River estuary): A – map of the anisotropy coefficient of SH-wave, Б – map of the Poisson's ratio, 1 – axes of stretching zones obtained by field research

На карте коэффициента Пуассона значения  $\mu$  близки к средним для этого типа пород. Только в пределах рассмотренной выше зоны отмечается их уменьшение, но и здесь они далеки от предельного ( $\mu = 0$ ). Это позволяет утверждать, что состояние грунтового массива в области формирования

потенциальной поверхности смещения на момент проведения измерений далеко от предельного. Косвенно этот вывод подтверждается тем, что через год на этом участке склона не было обрушения нового блока, а конфигурация кромки берегового уступа практически не изменилась.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методики теоретически и экспериментально обоснованы. Они успешно опробованы в различных природных и климатических условиях в криолитозоне и за ее пределами. Предлагаемые методики – эффективный и надежный инструмент при решении различных геокриологических, геологических, инженерно-геологических и геоэкологических задач.

Методика ВСПВ существенно расширяет возможности изучения строения верхней части геологической среды, особенно в условиях инверсного скоростного разреза, характерного для криолитозоны, когда применение преломленных волн ограничено или невозможно.

Методика донных сейсмических исследований на мелководных арктических акваториях обеспечивает непрерывное изучение сейсмогеологического разреза в переходной зоне суша – акватория и является связующим звеном между наземными сейсмическими наблюдениями и акустическими наблюдениями на акваториях.

Комплексирующие сейсмических и георадарных исследований позволяет повысить качество и объем геокриологических исследований при одновременной оптимизации стоимости геофизических работ.

Методика МРС предназначена для изучения и прогнозирования опасных геологических процессов на стадии их подготовки. Прежде всего она предназначена для изучения склоновых процессов, но может найти применение для изучения и прогнозирования других природных и техногенных процессов, аналогичных по механизму реализации.

Работы выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 16-17-00102).

### ЛИТЕРАТУРА

Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка : учебник для вузов. – Тверь : Изд-во АИС, 2006. – 744 с.

Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. – М. : ГЕОС, 2017. – 240 с.

Горяинов Н. Н., Скворцов А. Г. Сейсмоакустические методы при инженерно-геокриологических исследованиях // Инженерное мерзлотоведение : Материалы 3-й междунар. конф. по мерзлотоведению. – Новосибирск : Наука, СО, 1979. – С. 267–272.

Горяинов Н. Н., Боголюбов А. Н., Варламов Н. М. и др. Изучение оползней геофизическими методами. – М. : Недра, 1987. – 157 с.

Мельников В. П., Скворцов А. Г., Малкова Г. В. и др. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью геофизических методов // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 1. – С. 169–177.

Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Мин-во геологии СССР; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеол. и инж.

геол.; под ред. Н. Н. Горяинова. – М. : Недра, 1992. – 264 с.

Садуртдинов М. Р. Методика донных сейсмических исследований инженерно-геокриологических условий на предельном мелководье Арктики : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 24 с.

Садуртдинов М. Р., Малкова Г. В., Скворцов А. Г. и др. Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам геокриологических и геофизических исследований // Материалы V конф. геокриологов России, 14–17 июня 2016 г. – М. : Университет. книга, 2016. – Т. 1. – С. 340–346.

Садуртдинов М. Р., Царев А. М., Скворцов А. Г. и др. Геофизические методы изучения инженерно-геокриологических условий на стационаре Марре-Сале (Ямал) в зимний период : тр. междунар. конф. «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы» / под ред. В. П. Мельникова, Д. С. Дроздова, 02–05 июля 2015 г. – Тюмень : Эпоха, 2015. – С. 333–337.

Скворцов А. Г. Контроль за изменением устойчивости оползневых склонов с использованием сейсмических методов // Исследование гидрогеологических и инженерно-геологических объектов геофизическими и изотопными методами. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1988. – С. 32–43.

Скворцов А. Г. Особенности структуры поля упругих колебаний в нелитифицированных многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли. – 1997. – Т. 1, № 3. – С. 66–72.

Скворцов А. Г. Об особенностях кинематики сейсмических волн в толще нелитифицированных многолетнемерзлых пород : тез. докл. конф. «Проблемы криологии Земли», 20–24 апр. 1998 г. – Пушкино : Пушкинский НЦ РАН, 1998. – С. 260–261.

Скворцов А. Г. Высокоразрезающая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды // Инженерная геофизика: сб. материалов междунар. конф. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – С. 16–18.

Скворцов А. Г. Структура поля сейсмических колебаний в верхней части геокриологического разреза на территории Накынского кимберлитового поля (Якутия) // Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере Земли. – Пушкино, 2001. – С. 130–131.

Скворцов А. Г., Дроздов Д. С., Малкова Г. В. и др. Мониторинг напряженно-деформированного состояния берегового склона на геокриологическом стационаре «Болванский» с помощью сейсморазведки // Криосфера Земли. – 2006. – Т. 10, № 2. – С. 46–55.

Скворцов А. Г., Дроздов Д. С., Царев А. М. Современные сейсмические методы изучения оползневых процессов // Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития гражданского и промышленного комплексов города Москвы : тр. науч.-практ. конф., апрель 2008 г. – М., 2008. – С. 323–324.

Скворцов А. Г., Садуртдинов М. Р., Царев А. М. Изучение сейсмогеокриологических условий в пределах мелководных акваторий в криолитозоне // Геофизические методы исследования в криолитозоне : Материа-

лы Четвертой конф. геокриологов России (МГУ, 7–8 июня 2011 г.). – М. : Университет. книга, 2011а. – Т. 1. – С. 218–225.

Скворцов А. Г., Садуртдинов М. Р., Царев А. М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 83–90.

Скворцов А. Г., Царев А. М., Садуртдинов М. Р. Специфика сейсмических работ при геокриологических исследованиях // Там же. – 2011б. – Т. 15, № 4. – С. 110–113.

Скворцов А. Г., Царев А. М., Садуртдинов М. Р., Гаврилов А. В. Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах – опыт применения // Инновационные технологии и фундаментальные исследования в наземно-скважинной сейсморазведке и сейсмологии : Материалы XI междунар. конф. и выставки «Гальперинские чтения 11» (ОАО «Центральная геофизическая экспедиция». 24–28 окт. 2011в. – 4 с. (Электрон. ресурс). – [http://geovers.com/base/files/gr11/papers/9\\_Skvortsov\\_AG.pdf](http://geovers.com/base/files/gr11/papers/9_Skvortsov_AG.pdf)

Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. – М. : Изд-во МГУ, 2008. – 188 с.

Судакова М. С., Садуртдинов М. Р., Малкова Г. В. и др. Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 69–82.

Sadurtdinov M., Sudakova M., Malkova G. et al. Integration of seismic and GPR for studying the geocryological section in the floodplain of the Pechora River (Nenets District, Russia) / eds. F. Günther, A. Morgenstern : XI Intern. Conf. on Permafrost – Book of Abstracts, 20–24 June 2016. – Potsdam, Germany : Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016. – P. 451–452.

Sadurtdinov M. R., Tsarev A. M., Skvortsov A. G., Sudakova M. S. Vertical seismic profiling technique in shallow waters using P- and SH-waves : Materials of international conference «21<sup>st</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics», 6–10 September 2015a, Turin, Italy (Электрон. ресурс).

Sadurtdinov M. R., Tsarev A. M., Skvortsov A. G., Sudakova M. S. Seismic studies of frozen ground in Russian Arctic areas : Materials of international conference «7<sup>th</sup> Canadian Conference to the Permafrost», 20–23 September 2015b, Quebec, Canada (Электрон. ресурс).

Skvortsov A. G., Hunter J. A., Goriainov N. N. et al. High-Resolution Shear-Wave Reflection Technique for Permafrost Engineering Applications: New Results from Siberia / 62<sup>nd</sup> Annual International SEG Meeting. – New Orleans, 1992. – P. 382–383.

Snegirev A. M., Velikin S. A., Istratov V. A. et al. Geophysical monitoring in permafrost areas // Permafrost : 8<sup>th</sup> International conference on permafrost. – Zurich : ICOP, 2003. – P. 1079–1084.

Поступила в редакцию 03.11.2017 г.

## SEISMIC AND GROUND PENETRATING RADAR METHODS IN PERMAFROST RESEARCH

*M. R. Sadurtdinov, A. G. Skvortsov, M. S. Sudakova, A. M. Tsarev*

Original seismic research techniques have been developed at the Earth Cryosphere Institute of the SB RAS to study the structure, condition, and properties of rocks. They are widely used in scientific research as well as in industrial works within and beyond the cryosphere. Studies on the integration of seismic and ground penetrating radar (GPR) methods have been performed in order to improve the efficiency of solving geocryological problems.

**Keywords:** seismic, ground penetrating radar, high-resolution transverse wave seismic, multiwave multiasimuth seismic exploration, cryolithozone, bottom seismic studies.

### REFERENCES

- Boganik, G. N., Gurchik, I. I., 2006, Seismic Prospecting. Tver : AIS [In Russian].
- Vladov, M. L., Sudakova, M. S., 2017, Geologic Radar Location. From Physical Principles to Perspective Directions. Moscow : Geos [In Russian].
- Gorjainov, N. N., Bogolubov, A. N., Varlamov, N. M. et al., 1987. Geophysical Methods in Landslides Study, Moscow, Nedra [In Russian].
- Gorjainov, N. N., Skvortsov, A. G., 1979, Using Seismoacoustics in Sub-Surface Permafrost Studies. Sub-Surface Permafrost Study. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Permafrost, Novosibirsk : Science, Siberian Branch, pp. 267–272 [In Russian].
- Using Seismoacoustics in Hydrogeology and Sub-Surface Geology, Ed. Gorjainov N. N. Moscow, Nedra, 1992 [In Russian].
- Melnikov, V. P., Skvortsov, A. G., Malkova, G. V. et al., 2010, The Results of Permafrost Geophysical Studies in Arctic Areas, *Geology and Geophysics*, vol. 51, no. 1, pp. 169–177 [In Russian].
- Sadurtdinov, M. R., 2013, Seismic Technique of Sub-Surface Permafrost Investigations in the Arctic Shallow Waters. PhD Thesis, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow [In Russian].
- Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., Skvortsov, A. G., Sudakova, M. S., Slagoda, E. A., Dubrovin, V. A., 2015,

Geophysical Methods of Studying Sub-Surface Permafrost at the Marre-Salé in Yamal in Winter. Proceedings of the International Conference «Arctic, Subarctic: Mosaic, Contrast, Variability of the Cryosphere», ed. Melnikov V. P., Drozdov D. S., 02–05 July 2015. Tyumen : «The Epoch», pp. 333–337 [In Russian].

Skvortsov, A. G., 1997, Features of the Field Structure of Seismic Waves in Unlithified Permafrost, *Earth Cryosphere*, vol. 1, no. 3, pp. 66–72 [In Russian].

Skvortsov, A. G., 2005, High-Resolution S Waves Seismic Prospecting in Sub-Surface Geology, *Near Surface Geophysics*, Gelendzhik, pp. 16–18 [In Russian].

Skvortsov, A. G., 1998, Kinematics Features of Seismic Waves in Unlithified Permafrost. Proceeding of the «Problems of Earth Cryology» Conference, April 20–24, 1998, Pushchino, Pushchinsky Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 260–261 [In Russian].

Skvortsov, A. G., 2001, The Structure of Seismic Waves Field in the Sub-Surface Part of the Geocryological Section in the Territory of the Nakynsky Kimberlite Field (Yakutia). Proceeding of «Conservation and Transformation of Matter and Energy in the Earth's Cryosphere». Pushchino, pp. 130–131 [In Russian].

Skvortsov, A. G., Tsarev, A. M., Sadurtdinov, M. R., Gavrilov, A. V., 2011, High-resolution SH-wave Seismic Survey: Application Experience. Innovative Technologies and Fundamental Research in Ground and Borehole Seismic Exploration and Seismology – Proceeding of the 11<sup>th</sup> International Conference and Exhibition «Halperin Readings 11». JSC «Central Geophysical Expedition.» October 24–28, 4p. [http://geovers.com/base/files/gr11/papers/9\\_Skvortsov\\_AG.pdf](http://geovers.com/base/files/gr11/papers/9_Skvortsov_AG.pdf) [In Russian].

Skvortsov, A. G., Tsarev, A. M., Sadurtdinov, M. R., 2011, Specificity of Seismic Work in Permafrost Studing. *Earth Cryosphere*, vol. XV, no. 4, pp. 110–113 [In Russian].

Skvortsov, A. G., Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., 2011, Investigation of Permafrost Seismicity Conditions Within Shallow Water Areas. Geophysical Methods of Investigation in Permafrost Zone. Proceeding of the Fourth Conference of Russian Geocryologists. Moscow State University June 7–8, Part 2. Moscow : University Book, pp. 218–225 [In Russian].

Skvortsov, A. G., Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., 2014, Seismic Criteria of Identification of the Frozen State of Rocks. *Earth Cryosphere*, vol. XVIII, no. 2, pp. 83–90 [In Russian].

Sadurtdinov, M. R., Malkova, G. V., Skvortsov, A. G., Sudakova, M. S., Tsarev, A. M., 2016, The Current State of Island Permafrost in the Floodplain of the Pechora River (Nenets Autonomous Okrug) According to the Results of Geological and Geophysical Research. Proceeding of the Fifth Conference of Russian Geocryologists. M. V. Lomonosov Moscow State University, June 14–17, 2016 T1. Moscow : «University Book», pp. 340–346 [In Russian].

Skvortsov, A. G., 1988, Monitoring of Changes of Landslide Slopes Stability Using Seismic Methods. Research of Hydrogeological and Near Surface Objects by Geophysical and Isotopic Methods. Moscow : VSEGIN-GEO, pp. 32–43 [In Russian].

Skvortsov, A. G., Drozdov, D. S., Malkova, G. V. et al., 2006, Monitoring of the Deflected Mode of the Coastal Slope from the «Bolvansky» Geological Key Site Using Seismic Methods, *Earth Cryosphere*, vol. 10, no. 2, pp. 46–55 [In Russian].

Skvortsov, A. G., Drozdov, D. S., Tsarev, A. M., 2008, Modern Seismic Methods for Studying Landslide Process. Ecological and Sub-Surface Problems of Development of Civil and Industrial Complexes of the City of Moscow: Reports of Scientific and Practical Conference, April 2008, Moscow, pp. 323–324 [In Russian].

Starovoitov, A. V., 2008. Interpretation of Radar Ground Penetrating data. Moscow State University Publishing House. Moscow [In Russian].

Sudakova, M. S., Sadurtdinov, M. R., Malkova, G. V., Skvortsov, A. G., Tsarev, A. M., 2017, GPR Application of Geological Radar Location for All-Round Geocryological Studies, *Earth Cryosphere*, vol. XXI, no. 3, pp. 69–82 [In Russian].

Sadurtdinov, M., Sudakova, M., Malkova, G., Skvortsov, A., Tsarev, A., 2016, Integration of Seismic and GPR for Studying Geocryological Section in the Pechora River Floodplain (the Nenets District, Russia). Günther, F. and Morgenstern, A. (Eds.): XI. International Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 20–24 June 2016, Potsdam, Germany. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, pp. 451–452.

Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., Skvortsov, A. G., Sudakova, M. S., 2015, Vertical Seismic Profiling Technique in Shallow Waters Using P- and SH-waves. Materials of International Conference. 21<sup>st</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6–10 September Turin, Italy.

Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., Skvortsov, A. G., Sudakova M. S., 2015, Seismic Studies of Frozen Rocks in Russian Arctic Areas. Materials of International Conference, 7<sup>th</sup> Canadian Conference to the Permafrost., 20–23 September Quebec, Canada.

Skvortsov, A. G., Hunter, J. A., Goriainov, N. N. et al., 1992, High-Resolution Shear-Wave Reflection Technique for Permafrost Engineering Applications: New Results from Siberia. 62<sup>nd</sup> Annual International SEG Meeting. New Orleans, pp. 382–383.

Snegirev, A. M., Velikin, S. A., Istratov, V. A., Kuchmin, A. O., Skvortsov, A. G., Frolov, A. D., 2003, Geophysical Monitoring in Permafrost Areas. Permafrost: 8<sup>th</sup> International Conference on Permafrost. Zurich : ICOP, pp. 1079–1084.