

## STUDY OF THE NEOTECTONIC STRUCTURE OF THE BRATSK WATER RESERVOIR BED

A.G. Dmitriev<sup>1</sup>✉, K.G. Levi<sup>2</sup>, A.G. Vakhromeev<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** Production of natural gas and crude oil in the eastern regions of Russia was accelerated in the past decade, and both the upstream and midstream segments of the oil and gas industry continue to grow at a fast pace. Innovative solutions are needed for engineering and construction surveys aimed to justify options for choosing routes and methods for laying underwater pipeline sections across large rivers and water reservoirs. In our region, positive experience has been gained by employing modern technologies to optimize routing and reduce the costs of detailed surveys. In the project of the Kovykta – Sayansk – Angarsk – Irkutsk gas pipeline construction, an optimal route across the Bratsk water reservoir was chosen based on the results of several stages of investigation, including continuous seismic profiling and side-scan sonar scanning of the reservoir bed. At the first stage, the mosaic maps of side-scan sonograms and a 3D digital model of the reservoir bed bathymetry were constructed and used to develop and propose three options for the gas pipeline design and its route across the reservoir area. At the second stage, detailed underwater and onshore geophysical and drilling operations were carried out along the proposed routes. Based on the transverse profiles, a decision was taken to lay the pipeline section across the reservoir area in a trench along the northern route, which was justified as an economically and technologically optimal solution. In the winter period when the water reservoir surface was covered with thick ice, the northern route was investigated in detail by drilling and seismic survey operations using vertical seismometer cable assemblies and the inverse travel time curve technique. With reference to the velocity law, the travel time sections were processed and converted into depth profiles. A petrophysical model of bottom sediments was constructed, and a scheme was developed to ensure proper processing and interpreting of seismic and acoustic data. Four structural-material complexes were identified: modern silts; underwater eluvial and alluvial deposits; disintegrated and low-strength bedrocks of the Upper Lena Formation; and unaltered bedrock sandstones and siltstones. The continuous seismic profiles and the data from the vertical seismometer cable assemblies were interpreted, and a neotectonic map of bottom sediments was constructed. By analyzing the fault kinematics, it was revealed that normal faults and reverse faults with low-amplitude horizontal shear dominated in the study area; the mapped faults were mainly rootless structures; and displacements along the faults occurred due to a laminar flow of the Cambrian salt layers. An increase in tectonic activity from north to south was explained by the correspondingly degraded strength properties of the bedrocks. Modern neotectonic structures detected from the survey results gave evidence that the hydrostatic pressure increased after the reservoir had been filled with water, and the phenomenon of reservoir-related seismicity was observed in the study area. Based on the comprehensive geological and geophysical survey data, the geological and engineering conditions of the proposed construction sites were clarified, and the most appropriate route and design of the gas pipeline section across the reservoir area was approved. This study provided the pipeline designers with the qualitative and quantitative information on the phenomena and factors complicating the conditions for laying the gas pipeline in the study area.

**KEYWORDS:** gas pipeline; crossing; water reservoir; geophysical survey; seismic profiling; bathymetry; bottom sediment; vertical seismometer cable assembly; neotectonics; active fault

**FUNDING:** The study was carried out under Project 0346-2018-0002 of the Institute of the Earth's Crust SB RAS – Fundamental Problems of the Formation of Hydrocarbons and the Underground Hydrosphere of Sedimentary Basins in East Siberia. Part of the equipment was provided by the Geodynamics and Geochronology Center of the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

## RESEARCH ARTICLE

Received: August 30, 2020

Revised: July 10, 2021

Accepted: July 12, 2021

**Correspondence:** Alexander G. Dmitriev, [dmitriev1951@yandex.ru](mailto:dmitriev1951@yandex.ru)

**FOR CITATION:** Dmitriev A.G., Levi K.G., Vakhromeev A.G., 2021. Study of the neotectonic structure of the Bratsk water reservoir bed. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 792–804. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0555

## ИЗУЧЕНИЕ НЕОТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЛОЖА БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А.Г. Дмитриев<sup>1</sup>, К.Г. Леви<sup>2</sup>, А.Г. Вахромеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Расширение добычи (апстрим, upstream) и транспортировки (мидстрим, midstream) углеводородного сырья на Востоке России в последнее десятилетие реализуется весьма быстрыми темпами. Комплексное обоснование вопросов выбора трасс и способов прокладки подводных переходов продуктопроводов через русла больших рек и водохранилищ требует инновационных решений в области инженерно-строительных изысканий. Важные этапы работ с использованием новых технологий обеспечили сокращение затрат и оптимизацию трассировки под детальные изыскания. Опыт выбора оптимального створа перехода на примере магистрального газопровода Ковыкта – Саянск – Ангарск – Иркутск через Братское водохранилище включал аквальные сейсмоакустические работы методом непрерывного сейсмического профилирования и сканирования гидролокатором бокового обзора. На первом этапе исследований построены мозаики сонограмм гидролокатора и трехмерная цифровая модель батиметрии дна водохранилища. Эти данные позволили выбрать три варианта створов переходов газопровода. На втором этапе в пределах выбранных створов по поперечным профилям проведены детализационные аквальные и комплексные береговые геофизические и буровые работы, которыми обоснован выбор оптимального с экономической и технологической точек зрения северного траншейного варианта перехода. В его пределах в зимний период со льда проведены буровые и сейсмические работы с вертикальными сейсмическими косами по методике обращенного годографа. Полученный временной разрез и скоростной закон позволили обеспечить трансформацию временных разрезов в глубинные, сформировать петрофизическую модель донных отложений, а также схему обработки и интерпретации сейсмоакустических данных. В разрезе выделено четыре структурно-вещественных комплекса: современные илы; затопленные делювиальные и аллювиальные отложения; дезинтегрированные, малопрочные коренные породы верхоленской свиты и неизменные коренные песчаники и алевролиты. В результате интерпретации материалов непрерывного сеймопрофилирования и работ с вертикальными сейсмическими косами составлена неотектоническая карта донных отложений. Анализ кинематики разломных элементов показал, что среди разрывных нарушений преобладают сбросы и взбросы с малоамплитудными горизонтальными движениями. Картируемые разломы в основном являются бескорневыми структурами, а перемещения по ним – следствие ламинарного течения соленосных горизонтов кембрия. Отмечено увеличение тектонической активности с севера на юг, что объясняется ухудшением прочностных свойств коренных пород. Обнаруженные современные неотектонические структуры подтверждают, что в результате заполнения водохранилища и увеличения гидростатического давления в данном районе начали проявляться эффекты наведенной сейсмичности. Результаты комплексных геолого-геофизических исследований позволили определить инженерно-геологические условия различных участков строительства, выбрать наиболее целесообразный вариант трассы перехода и обеспечить проектировщиков информацией о явлениях, усложняющих горнотехнические условия прокладки газопровода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** газопровод; переход; водохранилище; геофизические изыскания; сеймопрофилирование; батиметрия; донные отложения; вертикальные сейсмические косы; неотектоника; активные разломы

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в соответствии с заданием базового научного проекта № 0346-2018-0002 ИЗК СО РАН «Фундаментальные проблемы формирования углеводородов и подземной гидросферы осадочных бассейнов Восточной Сибири». В работе частично задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие Ковыктинского газоконденсатного месторождения (КГКМ), уникального по запасам углеводородов, серьезно изменило потенциал Восточной Сибири [Smirnov et al., 2016]. На сегодня месторождение осваивается с целью экспортных поставок через магистральный газопровод «Сила Сибири». В то же время активно прорабатываются варианты региональной трубопроводной системы, главная задача которой – газификация

промышленных центров юга Иркутской области, Бурятии с планируемым последующим выходом в Монгольскую Народную Республику. С учетом сейсмичности региона на всем протяжении системы, уже на стадии технико-экономического обоснования строительства, наряду с традиционными инженерно-геологическими изысканиями необходима оценка геодинамического состояния территории. В случае реализации варианта строительства магистрального газопровода (МГ) по

трассе Ковыкта – Саянск – Ангарск – Иркутск наиболее сложным и затратным объектом является створ перехода МГ через Братское водохранилище, требующий нетрадиционных подходов к его изучению.

Братское водохранилище – второй по размерам в мире искусственный водоем, заполнение которого осуществлялось с 1961 по 1967 г. В соответствии с генеральным планом строительства участок перехода находится в Иркутской области между поселками Усть-Уда и Балаганск в центральной части Братского водохранилища. Перед комплексными геолого-геофизическими исследованиями стояли следующие задачи [Chiocci et al., 2011], решение которых обеспечит объективное обоснование способа прокладки магистрального трубопровода и корректный выбор места его заложения:

- построение батиметрической модели дна водохранилища;
- определение внутреннего строения и мощности рыхлых донных отложений;
- оценка состояния ложа водохранилища на наличие неотектонических форм и явлений (оползни, активные разломы, высокоградиентные формы рельефа дна и т.п.);
- установление зон потенциального карста, участков дна с субаквальной разгрузкой и с активным переносом донных отложений;
- выявление факторов, осложняющих строительство подводного перехода в траншейном либо тоннельном варианте (затопленные лесные массивы, суда, остатки строений, выходы останцев скальных пород и т.п.).

В геологическом строении верхней части разреза (ВЧР) района принимают участие верхнекембрийские отложения майского яруса средней подсвиты верхоленской свиты ( $G_3V_{1,2}$ ) и современные четвертичные ( $Q_{3-4}$ ) образования (рис. 1).

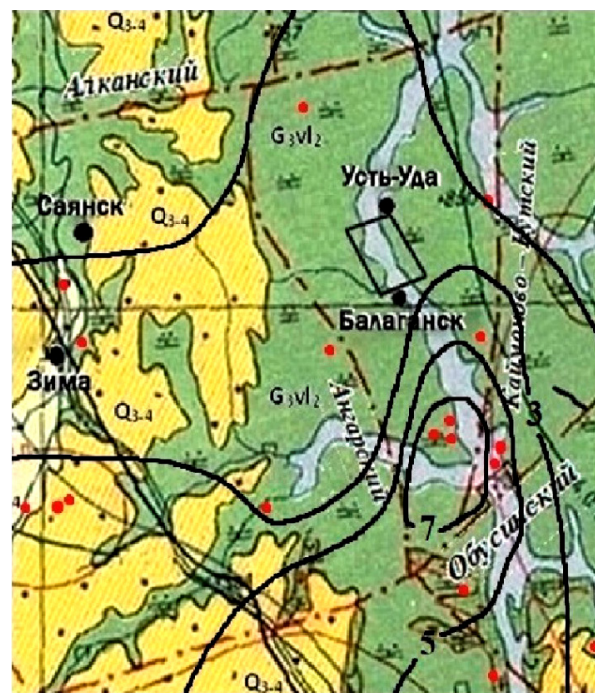
Отложения средней подсвиты верхоленской свиты подразделяются на четыре пачки: нижние (осинская, балаганская, усть-талкинская) и верхнюю (михайловская). Михайловская пачка по сравнению с нижележащими мергелями усть-талкинской пачки характеризуется более значительным распространением. Представлена она равномерно переслаивающимися между собой красноцветными песчаниками, алевролитами и аргиллитами с характерной среднеплитчатой отдельностью [Mel'nikov et al., 2010]. Мергели усть-талкинской пачки вскрыты четырьмя береговыми параметрическими скважинами на глубинах 45-60 м. Находясь в зоне активного водно-солевого обмена, все породы верхоленской свиты подвержены интенсивным физико-химическим изменениям.

Четвертичные ( $Q_{3-4}$ ) отложения представлены аллювиальными и элювиально-делювиальными образованиями, которые широко распространены и покрывают сплошным чехлом нижележащие толщи.

Аллювиальные отложения наиболее полно представлены в долине р. Ангары и ее крупных притоков, где они расчленены на верхний и современный отделы. К верхнему отделу четвертичной системы относятся

аллювиальные отложения комплекса террас высотой 10–12 м. Представлены они главным образом разнозернистыми песками максимальной мощностью до 15 м. Состав и характер руслового аллювия меняется в зависимости от геоморфологических особенностей отдельных участков. Аккумуляция аллювиального материала в основном приурочена к меандрам рек, где русловой аллювий слагает, как правило, мысовые косы и перегибы продольного профиля рек. Для таких участков характерна плохая отсортированность материала при резком преобладании галечно-валунных фракций. В местах пониженного рельефа русловой аллювий становится песчано-глинистым и лишь местами к нему примешивается валунный материал, переносимый речным льдом.

Элювиально-делювиальные отложения являются наиболее распространенными, слагая все склоны долин. Они представляют собой смешанную генетическую группу пород, накопление которых обусловлено явлениями плоскостного смыва и солифлюкции. Состав



**Рис. 1.** Фрагмент тектонической карты юга Сибирской платформы с эпицентрами и плотностью распределения землетрясений [Tectonic Map..., 1988].

1 – населенные пункты и контуры участка работ; 2 – четвертичные отложения  $Q_{3-4}$ ; 3 – отложения верхоленской свиты  $G_3V_{1,2}$ ; 4 – региональные разломы; 5 – эпицентры землетрясений; 6 – изолинии плотности эпицентров землетрясений.

**Fig. 1.** Fragment of the tectonic map of the southern Siberian platform as amended to show earthquake epicenters [Tectonic Map..., 1988].

1 – settlements, and the study area; 2 – Quaternary deposits,  $Q_{3-4}$ ; 3 – Upper Lena Formation,  $G_3V_{1,2}$ ; 4 – regional faults; 5 – earthquake epicenters; 6 – isolines of the density of earthquake epicenters.



элювиально-делювиальных образований зависит от состава коренных пород. Представлены они обычно супесями, суглинками, песками с обломками коренных пород, развитых выше по склону. Мощность элювиально-делювиальных отложений – от 0.8–1.5 м в верхней части склонов до 3–5 м в их нижней части.

В тектоническом отношении район работ располагается на западном склоне крупного Ангаро-Ленского (Верхнеленского) мезо-кайнозойского поднятия. Здесь венд-кембрийские отложения трансгрессивно налегают на сильнодислоцированные породы верхнего протерозоя и в верхнем ярусе чехла смяты в общем поле тангенциальных напряжений в линейную аллохтонную складчатость [Vakhromeev et al., 2019]. Унаследованное поднятие формировалось с нижнего палеозоя до кайнозойской эры путем «перекося» ложа осадочного чехла платформенной части Иркутского амфитеатра в результате различавшихся по амплитуде неравномерных вертикальных движений краевых (Ангаро-Ленского и Ангаро-Саянского) прогибов [Levi, Kulchitsky, 1981]. По режиму проявления тектонических движений в новейший этап оно отнесено к областям горообразования. Суммарные амплитуды неотектонических поднятий здесь колеблются от 500 до 1500 м. Границы поднятия являются тектонически обусловленными, геодинамически унаследованными и контролируются магистральными разломами в фундаменте юга кратона, положительной асимметричной мегаструктурой в чехле и контурами обрамляющих его прогибов – Предбайкальско-Предпатомского, Илимского и Предсаянского.

Еще в 60-е гг. XX в. непосредственный район работ считался тектонически стабильным. Так, на карте масштаба 1:150000 [Antropov et al., 1962] в данном районе разломы вообще отсутствуют. Однако дальнейшие исследования выявили, что русло р. Ангары как в меридиональном, так и в широтном направлениях вплоть до впадения в р. Енисей фрагментарно выполняет полости древних долин со следами обновления разломных зон.

Непосредственно в районе работ наиболее известны: меридиональные Ангарский и Каймоново-Кутский, а из широтных – Обусинский и Алкинский разломы [Tectonic Map..., 1988], оконтуривающие со всех сторон участок перехода газопровода и оказывающие существенное влияние на современную геодинамику района (рис. 1). По современным представлениям район является наиболее активной геодинамической структурой юго-западной части Сибирской платформы, сейсмические события в пределах которой наблюдаются достаточно регулярно. Плотность платформенных землетрясений магнитудой 4.5–5.5 в районе Балаганска достигает 7 событий на 1500 км<sup>2</sup> за 50 лет (рис. 1) при фоне от 1 до 3 [Seminsky et al., 2006]. Согласно СНиП II-7-81\* ОСП-97А, сейсмичность района для массового строительства по шкале МСК-64 составляет 7 баллов. При этом на состояние донных отложений существенно влияют не только сейсмичность, но и изменения

гидродинамического режима водохранилища, сезонные колебания уровня которого достигают 7.5 м. В связи с этим после заполнения Иркутского и Братского водохранилищ отмечается некоторое повышение сейсмической активности [Seminsky et al., 2008].

## 2. МЕТОДЫ

Комплексные геолого-геофизические исследования включали в себя береговые работы: сейсморазведку методом общей глубинной точки – площадки (ОГТ-ОГП), электроразведку в модификации вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ); в переходной зоне на мелководье – георадиолокационное зондирование (ГРЛЗ); а также аквальные геофизические исследования и контрольное бурение скважин различной глубины и назначения. Работы на акватории выполнялись методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП) с одновременным изучением дна гидролокатором бокового обзора (ГЛБО) [Dmitriev, Vakhromeev, 2015; Judd, Hovland, 2007]. Наблюдения проводились с помощью гидроакустического комплекса, который состоял из ГЛБО «Соник-2» и акустического профилографа «Соник-М141».

На первом этапе по сети продольных (относительно береговой линии) и ряда связующих поперечных профилей в контурах участка отработана вся чаша водохранилища. Основные элементы методики работ, способы обработки и интерпретации материалов приведены в [Baryshev et al., 2006]. Высокая плотность наблюдений позволила построить по результатам НСП карту глубин, а по данным ГЛБО – мозаику сонограмм дна. На основе комплексной интерпретации данных, в рамках пакета программ Golden Software Surfer-13, построена трехмерная батиметрическая модель дна водохранилища (рис. 2). Данная модель обеспечила выбор оптимальных ракурсов просмотра, которые позволили «сфокусированно реализовать объективность восприятия изображения» [Bondarev, 2007] при анализе изменчивости рельефа дна водохранилища.

В соответствии с морфометрией и расположением отдельных плесов район изысканий входит в Балаганский участок Братского водохранилища. Ширина водохранилища на этом участке изменяется от 2 до 4.5 км. Затопленная пойма Ангары имеет сравнительно высокие террасы, русло глубоко врезано и часто делится на рукава участками бывших островов. Поэтому берега сильно изрезаны, отличаются значительной крутизной и часто отвесны. Средняя глубина водохранилища около 25 м, наибольшая достигает 47 м.

На основе анализа материалов батиметрии под изыскания намечены три варианта створов перехода газопровода через Братское море: северный, центральный и южный. Поскольку реальные профили НСП невозможно точно совместить с линией проектируемой трассы перехода (в силу специфики технологии аквальных работ), в пределах выбранных створов проведены мероприятия по сгущенной сети по ряду поперечных профилей (рис. 3).

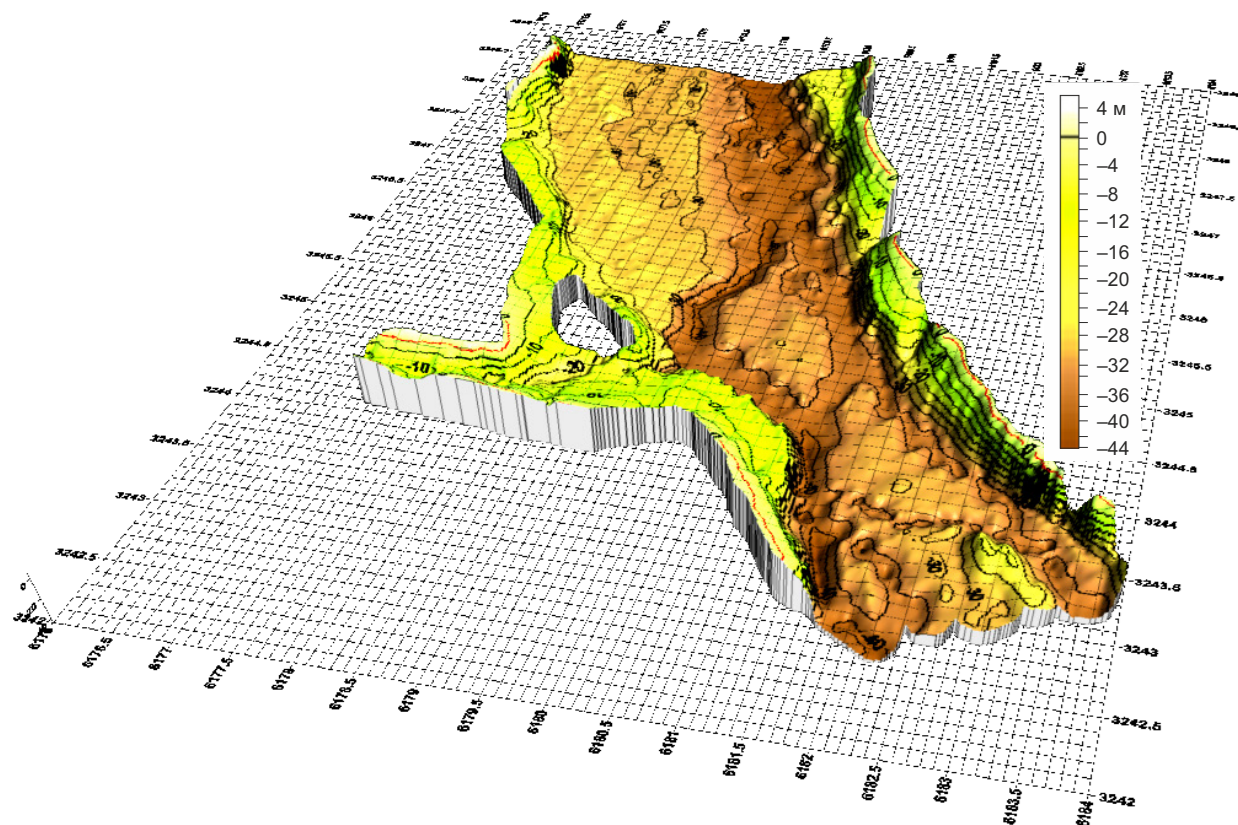


Рис. 2. Трехмерная батиметрическая модель дна Братского водохранилища.  
 Fig. 2. Three-dimensional bathymetric model of the Bratsk reservoir bed.



Рис. 3. Схема поперечных профилей НСП в пределах участка работ.  
 Fig. 3. Continuous seismic profiling (CSP) scheme of the study area.



### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам детальной обработки береговых и аквальных материалов выбраны два варианта створа:

– северный (профили 370–430) как наиболее оптимальный при реализации траншейной прокладки газопровода по дну водохранилища. Критериями выбора данного створа являлись незначительные (менее 8°) изменения в рельефе дна водохранилища, а также отсутствие в пределах трассы природных и техногенных осложняющих факторов (выходы коренных пород, затопленные деревья, строения, суда и т.п.);

– южный (профили 300–320) как оптимальный при тоннельном варианте реализации проекта перехода МГ, для которого основными факторами являлись минимальная длина перехода и соответствующие инженерно-геологические условия.

Центральный створ (профили 340–360), который первоначально рассматривался как основной, по причине наличия карста, подводного каньона глубиной до 30–35 м с активным переносом донных отложений, обусловленного левым притоком Ангары р. Бирит, а также больших (до 20°) углов береговых склонов исключен из рассмотрения [Dmitriev, Vakhromeev, 2015].

Анализ данных НСП, с учетом бурения береговых параметрических скважин глубиной до 100 м, показал, что в пределах южного варианта створа внутри аквальных комплексов в рыхлых отложениях коррелируется ряд сейсмических границ. Здесь условия залегания коренных пород существенно отличаются от геологической ситуации в пределах северного створа. Во-первых, это более значительная, до 10 м, мощность рыхлых делювиальных отложений. Во-вторых – наличие ярко выраженных современных тектонических процессов, о чем свидетельствуют резкое, до 20 м, увеличение мощности аллювия и смещение на 10–12 м отражающих горизонтов на левобережье палеорула р. Ангары. Это, а также возможное повышение экологических нагрузок на берега (подготовка площадок для проходческой машины, большая ширина раскрытия траншей в пойменной части), актуализация утилизации большого объема горной породы из тоннеля (~50 тыс. м<sup>3</sup>) и возможный подток солоноватых вод в тоннель поставили под сомнение экономическую целесообразность прокладки тоннеля и обусловили отказ от этого варианта перехода.

Одними из важнейших задач при инженерных изысканиях переходов газопроводной системы являются анализ геодинамической ситуации и выявление зон активных разломов, в пределах которых возможно усложнение горнотехнических условий прокладки трубопровода.

Основной сложностью при изучении подводных активных разломов является невозможность использования космоснимков и проведения детальных структурно-геологических и геоморфологических съемок. В связи с этим единственной инструментально полученной информацией при выявлении активных разломов были данные НСП и трехмерная батиметрическая

модель дна Братского водохранилища. В качестве ключевых признаков наличия неотектонических процессов использованы следующие традиционные косвенные критерии [Seminsky et al., 2006]:

- развитие оползневых процессов;
- резкие изменения мощности и фациального состава донных отложений;
- наличие древних сквозных корневых разломов;
- высокоградиентные изменения в рельефе дна.

На профилях НСП практически повсеместно выделяются зоны разрывов, смещающие ложе как четвертичных осадков, так и коренных пород, несогласное залегание современных донных отложений на русловом аллювии р. Ангары, а также оползневые процессы на крутых (до 30°) подводных склонах (рис. 4).

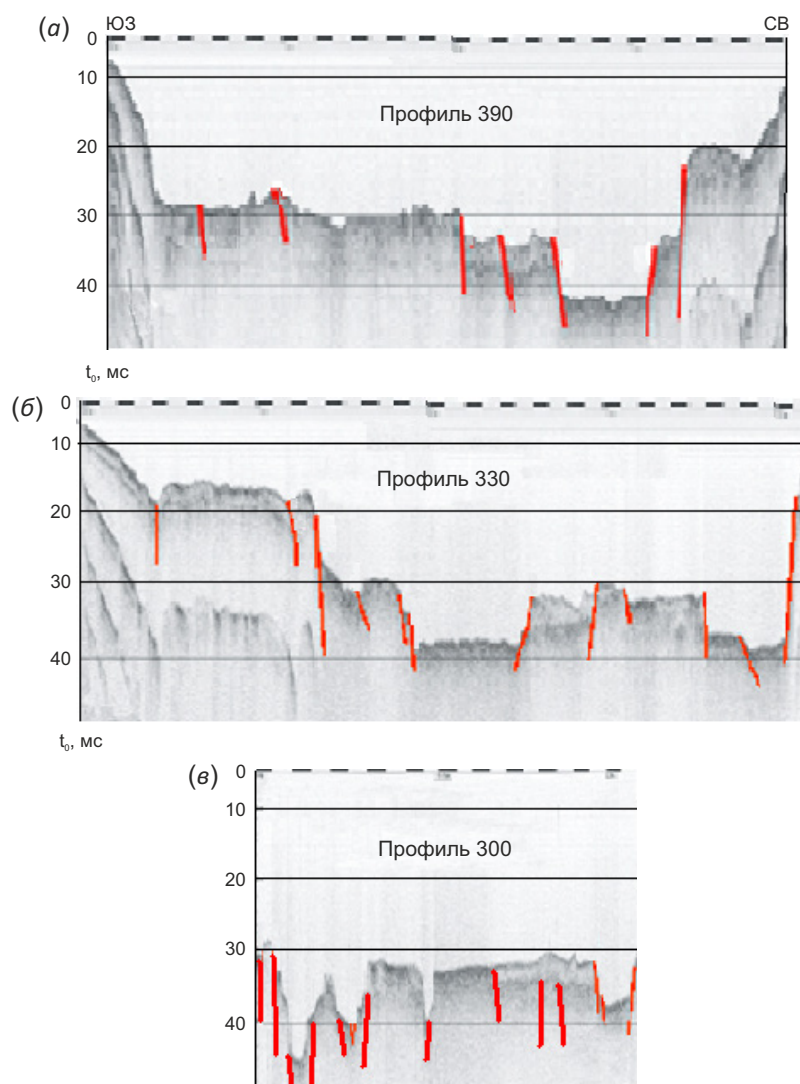
**Профиль 390** расположен в пределах северного створа. В его северо-восточной части отчетливо видно грабенообразное понижение дна, а также трехчленное строение пачки осадочных пород (рис. 4, а). В юго-западной части зафиксированы локальные выступы в рельефе, обусловленные выходом коренных пород.

**Профиль 330** находится южнее предыдущего, в центральной части участка. На временном разрезе НСП (рис. 4, б) отчетливо видны грабенообразные тектонические формы в палеоруле реки, разделенные затопленными островами. Судя по опрокидыванию блоков (их тыловые части располагаются ниже передовых), можно допустить, что разломы, вероятно, становятся более пологими с глубиной. Севернее профиля наблюдаются слияние всех рукавов затопленного русла р. Ангары и уменьшение на 5–7 м средней глубины ложа водохранилища.

**Профиль 300** располагается в южной, самой узкой части водохранилища. По данным НСП (рис. 4, в) рельеф дна водохранилища характеризуется развитием узких каньонообразных форм, высокой изменчивостью мощности и акустических свойств донных отложений как по глубине, так и по латерали.

Наличие косвенных признаков неотектонической активности на 2–4 соседних профилях являлось основанием выделения разлома. Плановое расположение разрывных неотектонических структур показано на рис. 5. Видно, что основная масса разломов в ложе водохранилища имеет субмеридиональное простирание вдоль русла. Все продольные разрывы в береговой зоне также субпараллельны таковым. Субширотные разломы редки. Наиболее ярко выражен разлом в центральной части участка, который проявляется в перепаде глубин и в изменении структуры грабенов, коррелирующихся с палеорулами р. Ангары. Если в южной части участка имеют место 3–4 меандрирующих протоки, то в северной части они объединяются в единый каньон глубиной до 47 м.

Анализ кинематики разломных элементов (с учетом деформаций рельефа поверхности и согласования разрывов с геологической структурой) показывает, что среди разрывных нарушений преобладают сбросы и взбросы с нечетко проявленными малоамплитудными



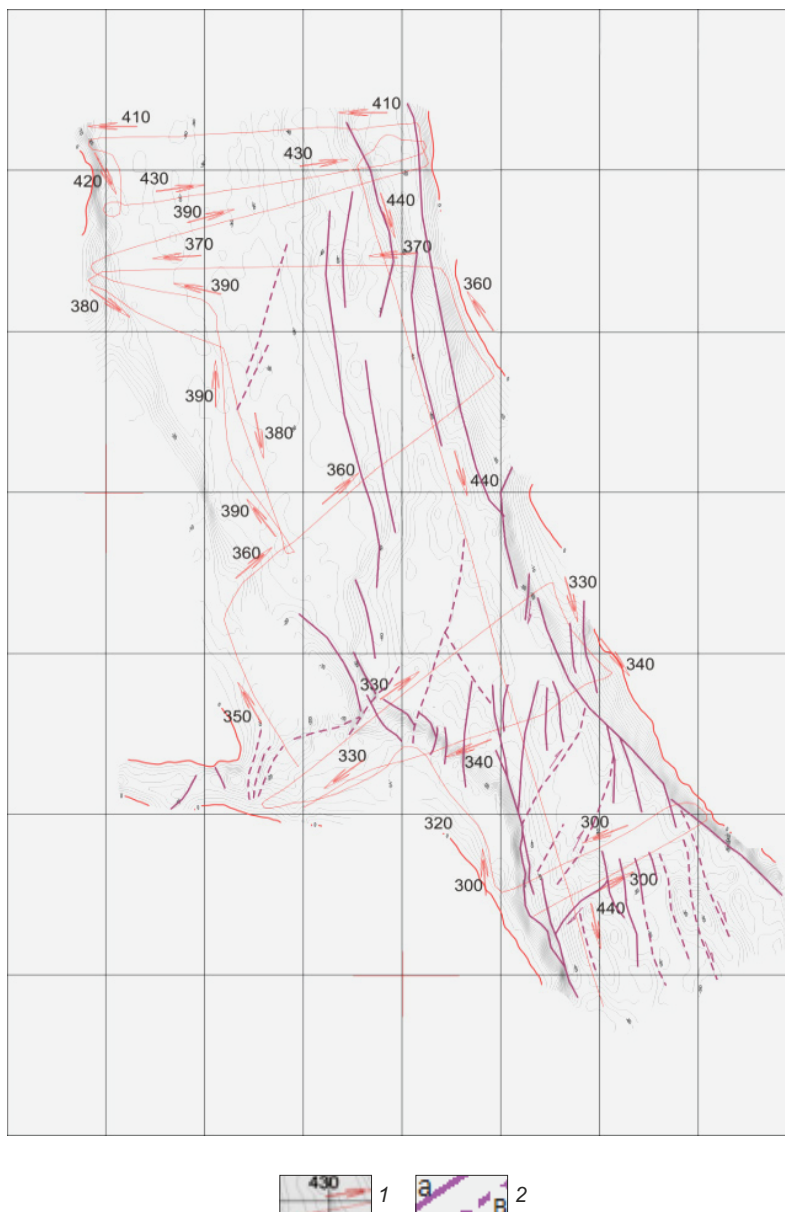
**Рис. 4.** Выборка временных разрезов НСП в пределах северного (а), центрального (б) и южного (в) вариантов створов перехода.

**Fig. 4.** Set of CSP travel time sections for the northern (a), central (b) and southern (c) pipeline crossing routes.

горизонтальными движениями. Картируемые в пределах Братского водохранилища разломы в основном являются бескорневыми структурами, а перемещения по ним – следствие ламинарного течения соленосных горизонтов кембрия. Обнаружение в процессе НСП современных неотектонических структур подтверждает, что в результате заполнения водохранилища и увеличения гидростатического давления, за счет наличия в основании разреза пластичных галогенно-карбонатных отложений усольской свиты, в данном районе начали проявляться эффекты так называемой наведенной сейсмичности. Об этом свидетельствуют пять землетрясений 1996–2002 гг. магнитудой 4.0–4.5 с эпицентрами в пределах контура Братского водохранилища [Seminsky et al., 2008]. Все это позволяет сделать вывод о необходимости заверки выделенных разрывов, изучения их природы и кинематики. Решение данной проблемы возможно на основе мониторинговых наблюдений за изменениями внутреннего строения и

мощности рыхлых донных отложений методом НСП и детального обследования береговых обнажений.

При относительной простоте реализации НСП, его большой производительности и т.п., данные метода не несут в себе информации о скоростной модели разреза, характерной для многоканальных модификаций метода отраженных волн. В связи с этим проведены сейсмические наблюдения с вертикальными сейсмическими косами по технологии метода обращенных годографов (МОГ – ВСК) [Baryshev et al., 2004; Sheriff, Geldart, 1982]. Впервые данная методика опробована в Арктике, во время дрейфа полярной станции, как альтернатива использованию подводных лодок с восьмиклометровыми сейсмическими косами [Kashik, 2000]. Поскольку применение вертикальных сейсмических кос минимизирует влияние высокоскоростных волн-помех, обусловленных льдом, появляется возможность зарегистрировать малоглубинные отражения. На Братском море работы проводились с привязкой к скважинам,



**Рис. 5.** Неотектоническая схема центральной части Братского водохранилища. 1 – номера профилей НСП и направление движения судна; 2 – разломы: а – существующие, в – предполагаемые.

**Fig. 5.** Neotectonic scheme of the central part of the Bratsk reservoir. 1 – the number of NSP profiles and the direction of movement of the vessel; 2 – faults: a – existing, в – proposed.

пробуренным со льда по трассе основной нити северного створа.

Скважины бурились не по равномерной сети, а закладывались с учетом материалов НСП в местах с максимальными изменениями внутреннего строения разреза. Глубина скважин по дну колебалась от 2.0 до 12.5 м, при этом в центральных частях водохранилища, где мощность водяного столба составляет 35–43 м, она достигала преимущественно 2.0–2.5 м, реже – 5.0 м. Коренные породы вскрыты лишь тремя скважинами. Остальные скважины пройдены по осадочным неустойчивым грунтам: суглинкам, супесям, пескам различной зернистости и илам. При этом значительное количество скважин из-за малой глубины не обеспечило

требуемую изученность грунтов для строительства подводного перехода траншейного типа.

Особенность используемой методики МОГ–ВСК состоит в том, что возбуждение и регистрация волнового поля осуществлялись в режиме накопления подо льдом в водном слое четырьмя разнесенными на 30 м шестиканальными вертикальными сейсмическими косями. Геофоны располагались с шагом 1 м на глубине от 3 до 8 м от поверхности льда. Глубина возбуждения упругих колебаний и шаг вдоль по профилю электроискрового источника мощностью 250 Дж составляли 2 м. Такая геометрия наблюдений обеспечивала повышенную устойчивость метода к помехам на этапе регистрации данных, а также позволяла усилить полезный



сигнал и подавить высокоскоростные волны-помехи. Обработка сейсмических данных была выполнена в среде интерактивной обрабатывающей системы Focus 5.1. С целью улучшения отношения «сигнал – помеха» на этапе препроцессинга к полевым сейсмограммам применены следующие процедуры: редактирование, мьютинг, энергетические анализы, полосовая частотная и веерная фильтрация, масштабирование, деконволюция и коррекция амплитудного затухания. На этапе детальной обработки сформирована геометрия наблюдений, произведены сортировка сейсмограмм по общей глубинной точке, расчет и коррекция кинематических поправок [Sheriff, Geldart, 1983]. При этом скорость в водном слое до первой отражающей границы принималась равной 1460 м/с. Поскольку пункты приема и возбуждения колебаний имели постоянную глубину – процедура коррекции статических поправок не применялась. На заключительном этапе обработки произведены суммирование трасс, частотная, обратная и когерентная фильтрации. В результате такой трансформации записей корреляция осей синфазности отраженных волн значительно улучшается. На записях отчетливо видны отражения от дна водохранилища и последующие вступления отраженных волн (рис. 6), характеризующие строение донных отложений. Все волны, имеющие иное направление распространения, падающие, кратные, боковые и т.п., были значительно ослаблены.

В результате детальной обработки построена сейсмогеологическая модель северного створа по эффективным и интервальным скоростям, обеспечившая уверенное расчленение донных рыхлых отложений, картирование кровли коренных пород и формирование

скоростной модели разреза (рис. 7). Коренные породы на временном разрезе проявляются в рельефе дна водохранилища и ассоциируются с гиперболическими зонами дифракции на временных разрезах, а также характеризуются повышенными значениями скоростей. В северо-восточной части профиля наблюдается серия разрывных нарушений. Их структура позволяет не только оценить ширину зоны переработки разлома, то есть мощность зоны дробления горных пород, но и расшифровать ее внутреннее строение.

Таким образом, в итоге проведенных опытных работ получены скоростная и глубинная модели аквальной части основной нити северного створа, которые увязаны с буровыми работами. На сегодня полученная модель является наиболее объективной из всех моделей северного створа как по детальности прослеживания горизонтов (шаг точек ОГТ составляет 7.5 м при глубине исследований по коренному ложу водохранилища до 30–35 м), так и по потенциальной возможности выделения структурно-вещественных комплексов (СВК) по скоростям продольных волн. Кроме того, только данная методика позволяет избавиться от высокоскоростных волн-помех, обусловленных льдом, производить изучение разрезов с точным расположением профилей строго вдоль буровых линий, при управляемой глубинности и разрешающей способности исследований. Особенно это будет проявляться при небольшой (до 30 м) глубине водных объектов, поскольку в данном случае интенсивные многократные волны от дна будут полностью затухивать полезные отражения. Для этого необходимо увеличить количество сейсмических кос до 12 и уменьшить расстояние между

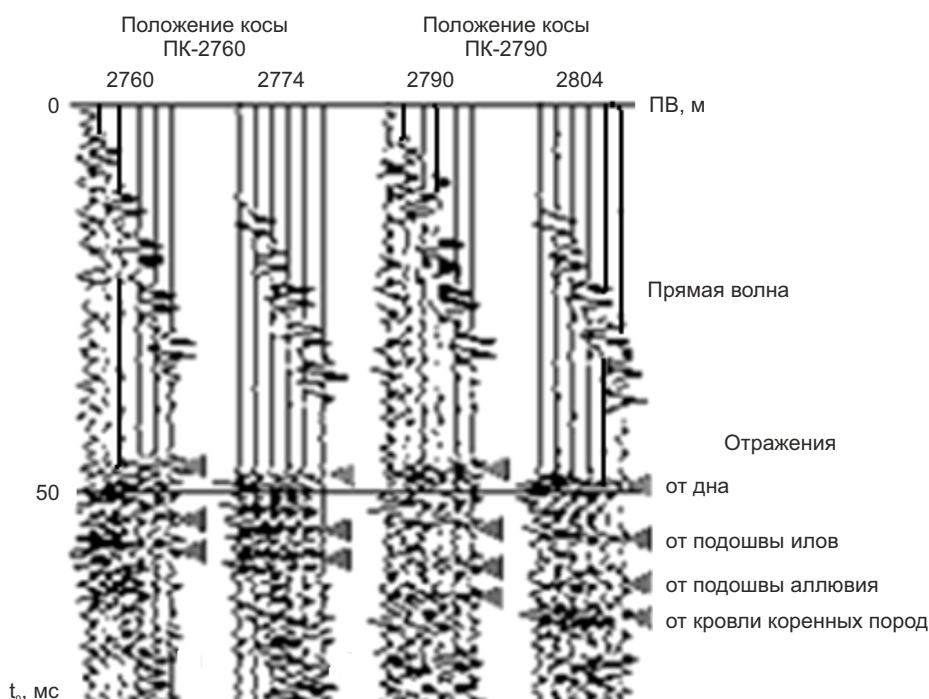
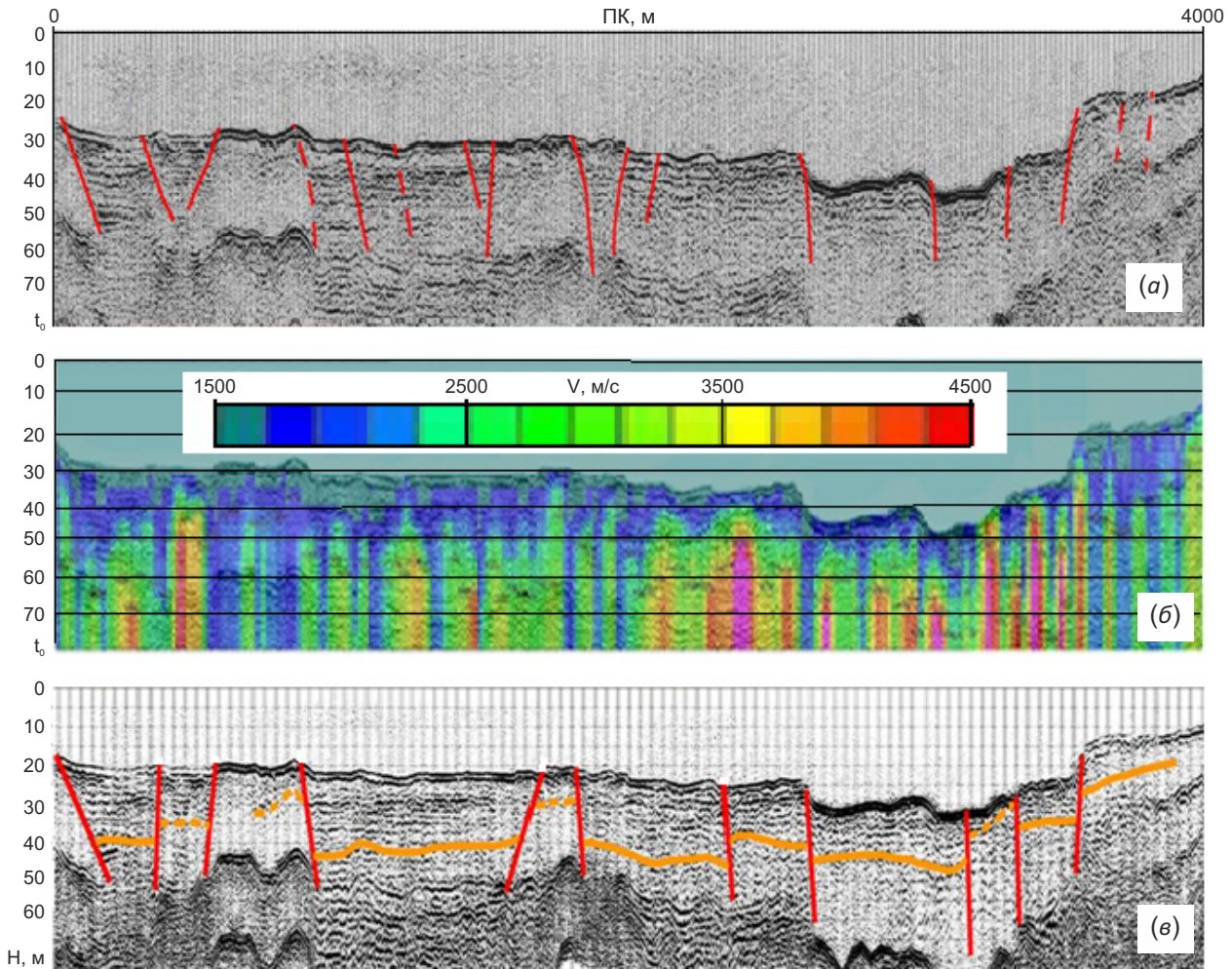


Рис. 6. Выборка сейсмограмм МОГ–ВСК после введения кинематических поправок.

Fig. 6. Set of WVSP–VSC seismograms after corrections for the kinematics.



**Рис. 7.** Результаты интерпретации МОГ–ВСК по основной нити северного створа. (а) – временной разрез, (б) – скоростной разрез, (в) – глубинный разрез (красным цветом выделены предполагаемые тектонические нарушения, оранжевым – предполагаемая поверхность коренных пород).

**Fig. 7.** Interpretation of WVSP–VSC seismograms for northern route. Cross sections: (a) – travel time, (б) – velocity, (в) – depth (red – assumed tectonic faults, orange – assumed surface of the bedrock).

ними до 10 м, что при незначительном снижении производительности работ повысит кратность наблюдений до 24, существенно увеличит глубинность исследований и, как следствие, прослеживаемость первого местного маркирующего горизонта – мергелей усть-талкинской пачки, глубина залегания которого составляет 45–60 м. Наличие нарушений корреляции данного горизонта в совокупности со скачкообразными изменениями глубины залегания регионального маркирующего горизонта  $H_1$  (кровля доломитов литвинцевской свиты), в непосредственной близости от перехода, обеспечили бы однозначное выявление и идентификацию корневых неотектонических разломов.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты бурения береговых параметрических скважин и скважин со льда в пределах северного створа, комплексная интерпретация данных МОГ–ВСК и углубленная обработка материалов НСП позволили практически на всех разрезах выделить 3–4 СВК, выполнить

их литолого-стратиграфическую привязку и сформировать петрофизическую модель (ПФМ) донных отложений Братского водохранилища [Dmitriev, Vakhromeyev, 2015].

Первый СВК мощностью от 0.5 до 2.5 м отождествляется с илами, текучими супесями и суглинками с примесью органического вещества. Эти образования имеют стабильные сейсмоакустические свойства, развиты повсеместно, хорошо коррелируются вдоль профилей по трех-, четырехфазной высокочастотной записи отражений и являются несущей основой трубопровода. Скорость продольных волн достаточно стабильна и составляет 1500 м/с. Данные бурения свидетельствуют о том, что эти отложения находятся в текучем состоянии, а их генезис обусловлен процессами осадконакопления и переработки пойменных почвенно-растительных грунтов зоны аэрации р. Ангары после образования водохранилища. Именно эти образования наименее устойчивы и характеризуются максимальной изменчивостью. Наиболее вероятные причины

**Таблица 1.** Интерпретационная петрофизическая модель донных отложений Братского моря  
**Table 1.** Petrophysical model of the bottom sediments of the Bratsk water reservoir

№ СВК	Литология	Мощность, м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Сопротивление, Ом·м	Скорости, м/с	
					$V_p$	$V_s$
1	Илы, текучие супеси, суглинки	0.5–2.5	1.45–1.52	100–150	1500	250–310
2	Пески, песчано-глинистые, гравийно-галечниковые отложения	1–7	1.60–1.82	50–80	1600–1800	300–500
3	Малопрочные, размягченные, дезинтегрированные коренные песчаники	4–6	1.80–1.95	350–550	1700–2000	800–1100
4	Монолитные коренные породы верхоленской свиты	–	2.4–2.6	100–200	2500–3000	1600–1900

подобных явлений – это воздействие близких землетрясений, а также течений, возникающих под влиянием резких изменений гидродинамического режима водохранилища. На отдельных участках выделяются интенсивные зоны дифракции, которые могут отождествляться с выходами коренных пород или проявлениями карста.

Второй СВК соответствует аллювиальным гравийно-галечниковым отложениям «древнего» русла р. Ангары и элювиально-делювиальным песчано-глинистым осадкам, которые представлены как пластичными, так и относительно уплотненными. Мощность этих отложений на различных профилях сильно варьирует. Скорость в данных отложениях несколько выше и колеблется в пределах 1600–1800 м/с. Выделение границы между коренными породами и этим комплексом зачастую проблематично из-за малого контраста акустических жесткостей. На наш взгляд, мощность данного горизонта достигает 8–10 м, что больше, чем значения, полученные при бурении в палеорусле р. Ангары. Об этом свидетельствуют выдержанность и стабильность по простиранию сейсмических горизонтов.

Третий СВК – это малопрочные, размягченные, дезинтегрированные коренные породы (песчаники верхоленской свиты), которые после затопления подверглись физико-химическим изменениям. Для этих отложений характерны зоны дифракций, явления малоамплитудной неотектоники и сложное строение. Они резко дифференцированы по простиранию, имеют изменчивую верхнюю границу и, вероятно, подвергнуты карстообразованию. Этот СВК, имеющий скорость 1700–2000 м/с, определяет физико-механическую стабильность подстилающих пород и возможность просадки газопровода в процессе его эксплуатации. На временных разрезах также можно выделить участки выходов во второй СВК коренных пород, что сопровождается повышенной изрезанностью дна. Подобные явления могут стать причиной увеличения объемов проходческих работ. Особенно ярко этот СВК проявлен в центральной части первой террасы (см. рис. 4, б) на левом берегу затопленной поймы.

Четвертый горизонт – предположительно, поверхность неизмененных коренных пород – алевролитов и песчаников верхоленской свиты, залегающих на глубине

10–25 м. В связи с небольшой мощностью горизонт прослеживается не всегда и сильно искажен вышележащими образованиями. Отложения сильно дезинтегрированы, трещиноваты, наблюдаются дифракционные явления. Об этом свидетельствуют невысокий коэффициент отражения, сильная изрезанность границы, а также характер керна коренных пород из ряда скважин. Прочностные свойства отложений верхоленской свиты очень низкие, что ставит под сомнение возможность прокладки тоннеля по этому горизонту.

Анализ результатов аквальных наблюдений, инженерно-геологическое опробование кернов береговых скважин и справочные данные позволили сформировать обобщенную интерпретационную ПФМ донных отложений Братского водохранилища (табл. 1).

В последующем данные сейсмоакустических исследований и интерпретационная петрофизическая модель донных отложений могут использоваться на этапе более детальных изысканий. В этом случае появляется возможность, на основе интерполяции данных НСП, создания трехмерных изображений (куба сейсмоданных), с последующим формированием синтетических (модельных) временных разрезов по любому выбранному срезу, даже там, где не было наблюдений.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью данной методики на основе навигационной базы данных каждая точка района исследований, в которой производились какие-либо измерения, наделяется номером, пространственными координатами и цифровой информацией (глубина, скорость, физико-механические свойства). По данным бурения каждая точка также наделяется атрибутивной геолого-геофизической информацией (литология, генезис, возраст, состояние и т.п.). При подобном подходе по мере накопления данных (сгущение сети наблюдений, получение принципиально новой информации) возможны выявление корреляционных связей между инженерно-геологическими и геофизическими параметрами разреза, детальная интерпретация полученных синтетических профилей НСП и формирование методом последовательных приближений физико-геологических 3D-моделей на любом этапе дальнейших более детальных исследований. В этом случае база данных



трансформируется в базу знаний и приобретает функции прогноза и экспертных оценок.

Опыт комплексных геолого-геофизических исследований на участке перехода через Братское водохранилище рекомендуется к применению в практике инженерно-геологических изысканий при технико-экономическом обосновании выбора трасс линейных сооружений (продуктопроводов, линий электропередач, мостовых переходов и т.п.) через крупные водоемы.

## 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Antropov P.Ya., Odintsov M.M., Tklich S.M. (Eds.), 1962. Geology of the USSR. Irkutsk Region. Geological Description. Vol. XVII. Part 1. Gosgeoltekhizdat, Moscow, 514 p. (in Russian) [Геология СССР. Иркутская область. Геологическое описание / Ред. П.Я. Антропов, М.М. Одинцов, С.М. Ткалич. М.: Госгеолтехиздат, 1962. Т. XVII. Ч. 1. 514 с.].

Baryshev S.A., Goguzev A.I., Dmitriev A.G., Plesovskikh V.N., Khlystov O.M., 2004. Experimental Vertical Seismic Profiling in the Water Area of Lake Baikal. In: Geophysics on the Eve of the Third Millennium. Proceedings of the 4th Baikal Youth School-Seminar (September 05–10, 2002). ISTU, Irkutsk, p. 121–126 (in Russian) [Барышев С.А., Гогузов А.И., Дмитриев А.Г., Плесовских В.Н., Хлыстов О.М. Опытные работы ВСП на акватории оз. Байкал // Геофизика на пороге третьего тысячелетия: Труды 4 Байкальской молодежной школы-семинара (5–10 сентября 2002 г.). Иркутск: ИрГТУ, 2004. С. 121–126].

Baryshev S.A., Vakhromeev A.G., Dmitriev A.G., Nosov V.V., 2006. Geophysical Engineering Surveys for the Kovykta – Sayansk– Irkutsk Gas Section across the Bratsk Water Reservoir. In: Modern Geodynamics and Hazardous Natural Processes in Central Asia. Vol. 5. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 92–98 (in Russian) [Барышев С.А., Вахромеев А.Г., Дмитриев А.Г., Носов В.В. Инженерно-геофизические изыскания перехода газопровода Ковыкта – Саянск – Иркутск через Братское водохранилище // Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. Иркутск: ИЭК СО РАН, 2006. Вып. 5. С. 92–98].

Bondarev V.I., 2007. Seismic Exploration. Publishing House of the Ural State Mining University, Ekaterinburg, 703 p. (in Russian) [Бондарев В.И. Сейсморастведка. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. 703 с.].

Chiocci F.L., Cattaneo A., Urgeles R., 2011. Seafloor Mapping for Geohazard Assessment: State of the Art. Marine Geophysical Research 32, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11001-011-9139-8>.

Dmitriev A.G., Vakhromeev A.G., 2015. Aquatic Geophysical Studies of the Zone for the Kovykta – Sayansk – Angarsk – Irkutsk Gas Pipeline Section across the Bratsk Reservoir. In: Engineering, Coal and Ore Geophysics in 2015. Current State and Development Prospects. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference and Exhibition of the Euro-Asian Geophysical Society (28 September – October 02, 2015). Sochi, p. 123–126 (in Russian) [Дмитриев А.Г., Вахромеев А.Г. Аквальные геофизические исследования зоны перехода магистрального газопровода Ковыкта – Саянск – Ангарск – Иркутск через

Братское водохранилище // Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015. Современное состояние и перспективы развития: Материалы 1-ой международной научно-практической конференции и выставка Евро-Азиатского геофизического общества (28 сентября – 2 октября 2015 г.). Сочи, 2015. С. 123–126].

Judd A., Hovland M., 2007. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press, London, 493 p.

Kashik A.S., 2000. Russian Petroleum Geophysics. Some Thoughts on the Eve of the Third Millennium. Russian Geophysics 3, 3–12 (in Russian) [Кашик А.С. Российская нефтяная геофизика. Некоторые мысли накануне третьего тысячелетия // Геофизика. 2000. № 3. С. 3–12].

Levi K.G., Kulchitsky A.A., 1981. Planation Surfaces of the Northeastern Part of the Baikal Rift Zone. In: Relief and Quaternary Deposits of the Stanovoy Upland. Nauka, Moscow, 19–35 (in Russian) [Леви К.Г., Кульчицкий А.А. Поверхности выравнивания северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны // Рельеф и четвертичные отложения Станового нагорья. М.: Наука, 1981. С. 19–35].

Mel'nikov N.V., Shabanov Yu.Ya., Shabanova O.S., 2010. Stratigraphic Chart of Cambrian Deposits in the Turukhansk–Irkutsk–Olekma Region, Siberian Platform. Russian Geology and Geophysics 51 (6), 863–875 (in Russian) [Мельников Н.В., Шабанов Ю.Я., Шабанова О.С. Стратиграфическая схема кембрийских отложений Туруханско-Иркутско-Олекминского региона Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 6. С. 863–875].

Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V., Radziminovich Ya.B., Bobrov A.A., 2006. Features of Active Faulting in the Southern Siberian Platform. In: Modern Geodynamics and Hazardous Natural Processes in Central Asia. Vol. 5. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 63–78 (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Черемных А.В., Радзиминович Я.Б., Бобров А.А. Особенности проявления активных разломов на юге Сибирской платформы // Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. Иркутск: ИЭК СО РАН, 2006. Вып. 5. С. 63–78].

Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Vakhromeev A.G., Cheremnykh A.V., Bobrov A.A., Kogut E.I., 2008. Faults and Seismicity of the Southern Siberian Platform: Features of Manifestation at Different Scale Levels. Lithosphere 4, 3–21 (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Вахромеев А.Г., Черемных А.В., Бобров А.А., Когут Е.И. Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы: особенности проявления на разных масштабных уровнях // Литосфера. 2008. № 4. С. 3–21].

Sheriff R.E., Geldart L.P., 1982. Exploration Seismology. History, Theory and Data Acquisition. Vol. 1. Cambridge University Press, 253 p.

Sheriff R.E., Geldart L.P., 1983. Exploration Seismology. Data-Processing and Interpretation. Vol. 2. Cambridge University Press, 221 p.

Smirnov A.S., Gorlov I.V., Yaitsky N.N., Gorsky O.M., Ignatiev S.F., Pospeev A.V., Vakhromeev A.G., Agafonov Yu.A.,

Buddo I.V., 2016. Integration of Geological and Geophysical Data – The Way to Constructing a Reliable Model of the Kovykta Gas Condensate Field. *Oil and Gas Geology* 2, 56–66 (in Russian) [Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н., Горский О.М., Игнатъев С.Ф., Поспеев А.В., Вахромеев А.Г., Агафонов Ю.А., Буддо И.В. Интеграция геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66].

Tectonic Map of the Southern Regions of East Siberia, 1988. Scale 1:1 500 000. VostSibNIIGGiMS, Irkutsk (in Russian) [Тектоническая карта юга Восточной Сибири.

Масштаб 1:1500000. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГГиМС, 1988].

Vakhromeev A.G., Smirnov A.S., Mazukabzov A.M., Gorlov I.V., Misyurkeeva N.V., Shutov G.Ya., Ogibenko V.V., 2019. The Upper Lena Shield Uplift – The Main Object for Preparation of the Hydrocarbon Resource Base in the Southern Part of the Siberian Platform. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 3 (39), 38–56 (in Russian) [Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Мазукабзов А.М., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В., Шутов Г.Я., Огибенко В.В. Верхнеленское сводовое поднятие – главный объект подготовки ресурсной базы Иркутского центра газодобычи // Геология и минеральные ресурсы Сибири. 2019. № 3. С. 38–56].