



УДК 550.834(571.5)

О РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ: ИСТОРИЯ, ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Е. В. Мосягин¹, А. С. Ефимов²¹Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия; ²Новосибирский филиал ВНИГНИ, Новосибирск, Россия

С начала 2000-х гг. на Сибирской платформе были выполнены речные сейсморазведочные работы по протяженным маршрутам по рр. Нижняя Тунгуска, Лена (в верхнем и нижнем течении), Витим, а также более локальные работы, в том числе опытно-методического характера, по рр. Ангара, Чуна, Бирюса. Высокая геологическая эффективность этих маршрутов в совокупности с почти двукратным снижением стоимости 1 пог. км сейсмического профиля относительно обычных наземных работ МОГТ позволяет рекомендовать расширение подобных исследований на реках северной части Тунгусской синеклизы, где изученность нефтегазоперспективных уровней очень низка, но на балансе числится четверть всех ресурсов углеводородов Сибирской платформы.

Ключевые слова: сейсморазведка, МОГТ-2D, Восточная Сибирь, Сибирская платформа, речная сейсморазведка, верхняя часть разреза, Нижняя Тунгуска.

ABOUT WATER SHOOTING: HISTORY, EXPERIENCE OF APPLICATION, FEASIBILITIES AT THE PRESENT STAGE OF RESEARCH OF THE SIBERIAN PLATFORM

E.V.Mosyagin¹, A.S.Efimov²¹Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resource, Novosibirsk, Russia; ²Novosibirsk branch of All-Russian Research Geological Oil Institute, Novosibirsk, Russia

Since the beginning of the 2000s, water shooting has been carried out on the territory of the Siberian Platform on a number of profiles, including long routes along the Nizhnyaya Tunguska [Lower Tunguska] River, Lena River (in the upper and lower courses), Vitim River, as well as more local works, including experimental and methodological ones – at the Angara, Chuna, and Biryusa Rivers. The high geological efficiency of these routes, combined with an almost twofold reduction in the cost of one linear km of seismic profile, comparatively common ground-based operations of the CDP method, allows researchers to recommend the expansion of such operations on the rivers of the northern Tunguska syncline, the area with very low exploration degree of prospects of oil and gas. It is situated in the region where a quarter of all the hydrocarbon resources of the Siberian Platform are on the balance sheet.

Keywords: seismic survey, 2D CDP, East Siberia, Siberian Platform, water shooting, NSS, Nizhnyaya Tunguska.

DOI 10.20403/2078-0575-2021-3-48-60

Анализируя историю, методические и технологические приемы нефтегазоперспективных сейсморазведочных исследований в Восточной Сибири, отметим низкую информативность сеймопрофилей областей Тунгусской синеклизы и соседних районов, зоны интенсивного проявления траппового магматизма. Здесь верхняя часть разреза (ВЧР) осадочно-тектоническими образованиями нижнего триаса, но и насыщена пластовыми и секущими телами долеритов. Таким образом, строение ВЧР исключительно сложное, особенно до глубин 400–700 м, что искажает результаты исследований любым геофизическим методом при изучении строения нижележащих перспективных горизонтов. Мелкоблоковое строение ВЧР вызывает рассеивание энергии в условиях грубообломочных пирокластических пород триаса, мощный фон реверберации приповерхностных волн, формируемый пластами траппов в ВЧР, резкие локальные скоростные аномалии. Поэтому прослеживание и часто опознавание опорных отражающих горизонтов на разрезах весьма затруднено.

В этой ситуации выделяются сейсмические профили, отработанные вдоль рек и характеризующиеся яркой динамической выразительностью волнового пакета кембрийских горизонтов.

При анализе эффективности нефтепоисковых сейсморазведочных исследований следует остановиться на эволюции методик и технологий проведения так называемой речной сейсморазведки – сейсморазведки МОВ вдоль рек, где они являются транспортными магистралями для проложения сейсморазведочных профилей. Широко применялась речная сейсморазведка на начальной стадии нефтепоисковых работ в Западной Сибири, что позволило за очень короткое время осветить основные сейсмогеологические особенности регионального строения юрско-меловых горизонтов. При этом сравнительно простые волновые пакеты опорных отражений позволяли использовать несложные методические приемы в формате дискретных зондов МОВ. Очень плавное течение рек с достаточными глубинами позволяли применять буксируемые плавающие сейсмические косы. Здесь почти отсутству-



ют придонные турбулентные завихрения песчаных частиц и насыщенные воздухом водяные струи, которые характерны для перекатов и мелководного песчано-галечного дна, потому фон волн-помех, распространяющихся в воде или по ней, весьма ограничен, а это, в свою очередь, определяет высокие значения отношения сигнал/помеха на сейсмограммах речных зондов МОВ. В 1950–1960-х гг. экологические ограничения к взрывам в реке были низкими.

В условиях сложнейшей орогидрографии западной части Сибирской платформы (перепады высот до 600–1000 м) и практически полного отсутствия транспортной инфраструктуры геофизические маршруты вдоль рек позволили в короткие сроки изучить основные региональные особенности строения перспективных горизонтов венда и нижнего кембрия. Но информативность таких работ в сравнении с Западной Сибирью была в целом невысокой. Рельеф рек, малая вода, резко меняющиеся скорости течения, большое количество перекатов исключали применение плавающих, донных кос и, соответственно, проектирование протяженных и непрерывных профилей.

В 1970-е гг. речные геофизические маршруты выполнялись по методике зондирования с шагом расстановки сейсмических кос через 3–5 км. Зондирование МОВ выполнялось на базе 600–1200 м короткой расстановки 24–48 сейсмоприемников из 2–4 пунктов взрыва (ПВ). Расстановка сейсмоприемников и бурение групп мелких скважин для ПВ производились на пойменной террасе. Использовались моторные лодки, легкие катера, резиновые плоты для транспортировки грузов. В целом работы были малозатратные и высокопроизводительные: за короткое северное лето небольшой сейсмический отряд отрабатывал маршрут протяженностью несколько сотен километров.

На следующем этапе методика таких маршрутов была усложнена до дискретного профилирования МОВ с кратностью 1–3 на отдельных профилях протяженностью до 5–10 км. Затем, в 1980-е гг. методика такого профилирования была усложнена до 6–12-кратного МОГТ с использованием отечественных цифровых сейсмостанций, протяженность отдельных профилей по маршруту ограничивалась рельефом, невозможностью размотки кабелей и сейсмических кос, переходом расстановки сейсмоприемников на противоположный берег реки. Преимущество таких профилей относительно наземной сейсморазведки междуречий заключалось в значительно более высокой прослеживаемости опорных отражений, благодаря исключению влияния приповерхностных неоднородностей на нижележащие горизонты, а это 200–400 м ВЧР с мелкоблоковым строением. Геологическую эффективность такого профилирования снижали методические и технологические ограничения: взрывы производились в мелких скважинах (бурение легкими мотобурами

ограниченной глубинности – до 1 м), приповерхностные взрывы возбуждали мощнейший фон приповерхностных волн, системы наблюдений МОГТ часто ограничивались фланговыми расстановками с выносом ПВ из-за приповерхностных взрывов на 300–500 м. Все это ограничивало возможности ОГТ при анализе скоростей и расчетах статических поправок за зону малых скоростей (ЗМС). Ужесточение экологических требований к применению взрывов вблизи рек в 1990-е гг. привело к отказу от подобных работ.

Но в целом информативность таких сейсмических профилей МОГТ по значениям прослеживаемости опорных отражений была весьма высокой благодаря отсутствию «рельефа», т. е. отсутствию большей части ВЧР с ее зараженностью траппами, мелкоблоковостью сейсмоакустических свойств, т. е. всего, что в этих регионах ограничивает фокусировку годографа отраженной волны при обработке полевых материалов.

В 2000-е гг. применение речной сейсморазведки возобновилось [1, 2, 6], при этом существенно увеличилась кратность МОГТ, началось использование бескабельной регистрации; невзрывных пневматических либо электродинамических источников, транспортируемых и работающих по руслу реки и обладающих технологическими возможностями быть эффективными и при малой воде (менее 1 м); современных технологий цифровой обработки в условиях криволинейного профиля. Пример результатов таких работ приведен рис. 1 (профиль высокочастотного МОГТ длиной 1500 км вдоль р. Нижняя Тунгуска; работы 2012–2014 гг. на землях III категории сложности для проведения сейсморазведки, протекающей на всем своем протяжении в зоне с интенсивным трапповым магматизмом) [4, 7].

«Речные» сейсмопрофили были отработаны в среднем – верхнем течении р. Лена в 2006–2008 гг. Геофизической службой СО РАН; в 2008–2009 гг. по рекам Ангара и ее притокам Чуна и Бирюса – Богучанской геофизической экспедицией и Енисейгеофизикой; в 2012–2014 гг. по р. Нижняя Тунгуска с притоками Кочечум и Тутончана – СНИИГГиМС с привлечением Донгеофизики, Богучанской ГФ и Геофизической службы СО РАН. В 2018 г. речные работы были выполнены в нижнем течении р. Лена, а в 2019 г. – по р. Витим (Геофизическая служба СО РАН).

Действующий этап возобновления «речной» сейсморазведки начался с проведения опытно-методических работ по выбору и обоснованию приемов расстановки сейсмоприемников (регистраторов) донных, плавающих, наземных по урезу воды, типов невзрывных источников возбуждения упругих колебаний – пневматических (разной емкости, различного группирования одиночных пневмопушек) и электродинамических. По их результатам выяснилось, что для рек Восточной Сибири на качество первичного материала наиболее существенно влия-

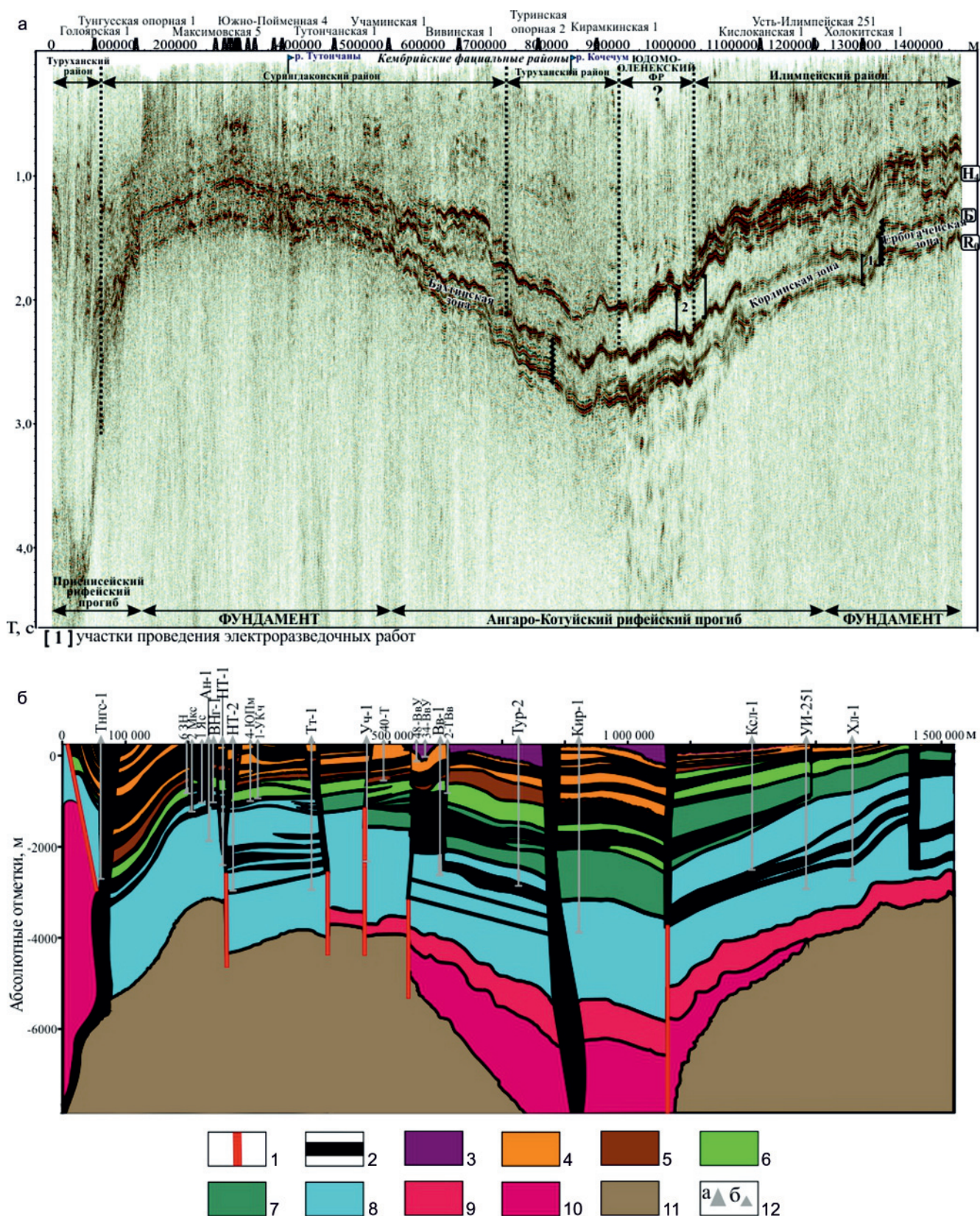


Рис. 1. Сейсмический временной разрез по профилю р. Нижняя Тунгуска протяженностью 1500 км (а) и распределение интрузивных траппов в осадочном чехле вдоль профиля (б)

1 – разрывные нарушения; 2 – интрузивные образования; 3–10 –осадочные образования: 3 – нижнего триаса, 4 – верхнего палеозоя, 5 – девона, 6 – силура, 7 – ордовика, 8 – венд-кембрия, 9 – венда, 10 – рифея; 11 – образования фундамента; 12 – скважины: а – глубокие, б – колонковые

ют условия расположения регистраторов сейсмического сигнала (сейсмоприемников). Наиболее обширное и детальное опробование и сопоставление

водной (плавающей и донной) и наземной сейсмической кос были проведены на рр. Лена и Нижняя Тунгуска. В итоге подтверждена их идентичность

(вплоть до значения уровня регистрируемых помех). Далее приведены основные результаты по выбору типа сейсмической косы, проведенные на р. Нижняя Тунгуска.

Опытно-методические работы по оценке технологий водной, наземной регистрации при «речной» сейсморазведке были проведены в СНИИГГиМС в 2013 г. (с привлечением Донгеофизики, Богучанской ГФ и Геофизической службы СО РАН) в среднем течении р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура. Основным вывод этих сопоставлений заключается в том, что использование донных кос на участках быстрого течения р. Нижняя Тунгуска невозможно для кондиционной регистрации сейсмических колебаний. Сильное течение и галечное дно реки на участках с глубиной менее 1,5–2,0 м создают высокий уровень микросейсмических колебаний – до 300–800 МкВ и более (до 3000 МкВ), не позволяющий выполнить работы с приемлемым качеством. Анализ карты лоции р. Нижняя Тунгуска показал, что неблагоприятные участки составляют не менее 20–30 % от ее общей длины. Характерная запись фонового шума гидрофонов имеет уровень помех в зашумленных зонах 300–2000 МкВ, в спокойной зоне – 10–50 МкВ. Основные результаты приведены на рис. 2, 3.

Донная коса состоит из модулей, содержащих гидрофон и геофон, расположенные через 50 м. Наземная коса представлена группами сейсмоприемников, центры которых располагались с шагом 50 м. Каждая группа включает в себя шесть последовательно соединенных геофонов GS-20DX. Донная и наземная косы располагались параллельно. Возбуждение упругих колебаний выполнялось в воде на глубинах более 1,0–1,5 м десятью пневмоисточниками, расположенными в две линии по бортам судна.

Регистрация сейсмических колебаний донной косой показала, что помеха, производимая течением реки, и характеристики речного дна дают общий средний уровень шума в 100–1000 раз выше, чем при регистрации наземной косой, расставленной вблизи уреза воды.

Использование при производстве работ комбинированной схемы наблюдений с применением донной и береговой кос нежелательно, да и логистически часто невозможно. Протяженность участков «тихой» и «шумной» воды крайне неравномерная, а технология регистрации колебаний будет очень сложной, непроизводительной и, главное, в чистом виде не реализуемой.

Одним из факторов, повысившим эффективность речной сейсморазведки, стала разработка многофункционального радионавигационного комплекса МРК-32 (водный вариант), применение которого позволило приблизиться к решению проблемы геодезической привязки в режиме «онлайн» источников, плывущих и непрерывно работающих. Впервые технология была отработана АО «Енисей-

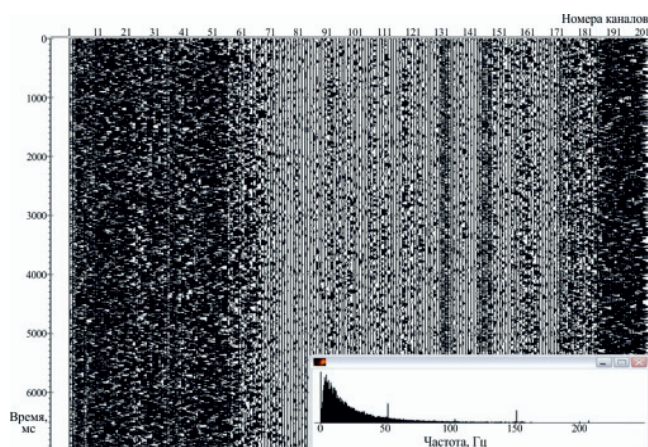


Рис. 2. Запись фонового шума гидрофонов (начало донной косы расположено вблизи переката – участка реки с быстрым течением в месте сужения русла, центральная часть – на относительно спокойном участке)

геофизика» по рр. Ангара и Бирюса в 2008–2009 гг. Разработка комплекса выполнена в 2008 г. Сибирским федеральным университетом [3] и соответствует требованиям Федерального закона о навигационной деятельности от 14.02.2009 г. № 22-ФЗ. На рис. 4 представлена обобщенная структурная схема многофункционального радионавигационного комплекса (МРК) с отдельными узлами: спутниковый ГЛОНАСС/GPS приемник и антенная система с заглушающими дроссельными кольцами для ослабления сигналов, отраженных от препятствий, например, крутых берегов реки и деревьев. На рис. 5 показано конструктивное размещение ее узлов на речном судне. В процессе исследований получены следующие точностные характеристики для созданного аппаратного комплекса на основе МРК-32: автономный режим измерений (без корректирующих поправок); среднеквадратичное отклонение местоположения 15 м; относительный режим определений (опорная и мобильная станции) местоположения; точность, вычисленная в камеральных условиях (постобработка), с учетом корректирующих поправок 1,0–1,5 м.

Качество «речной» сейсморазведки показано на сейсмических разрезах (рис. 6–9).

Разрез по маршруту вдоль р. Нижняя Тунгуска протяженностью 1500 км (см. рис. 1) отработан по технологии ПВ в движении, со средним шагом ПВ около 6 м, достигнутой кратностью в пределах 300–2000 (в зависимости от методов и параметров бинирования), шагом общей площадки отражения вдоль маршрута 25 м. Во-первых, иллюстрируются возможности высокой кратности МОГТ в условиях сложнейшей сейсмогеологии ВЧР в трапповой зоне, во-вторых, подтверждается необходимость сгущения шага ПП и ПВ в подобных областях [5] и, в-третьих, показаны возможность и эффективность работы с источником в движении.

Отдельного внимания заслуживает методика обработки профилей речной сейсморазведки,

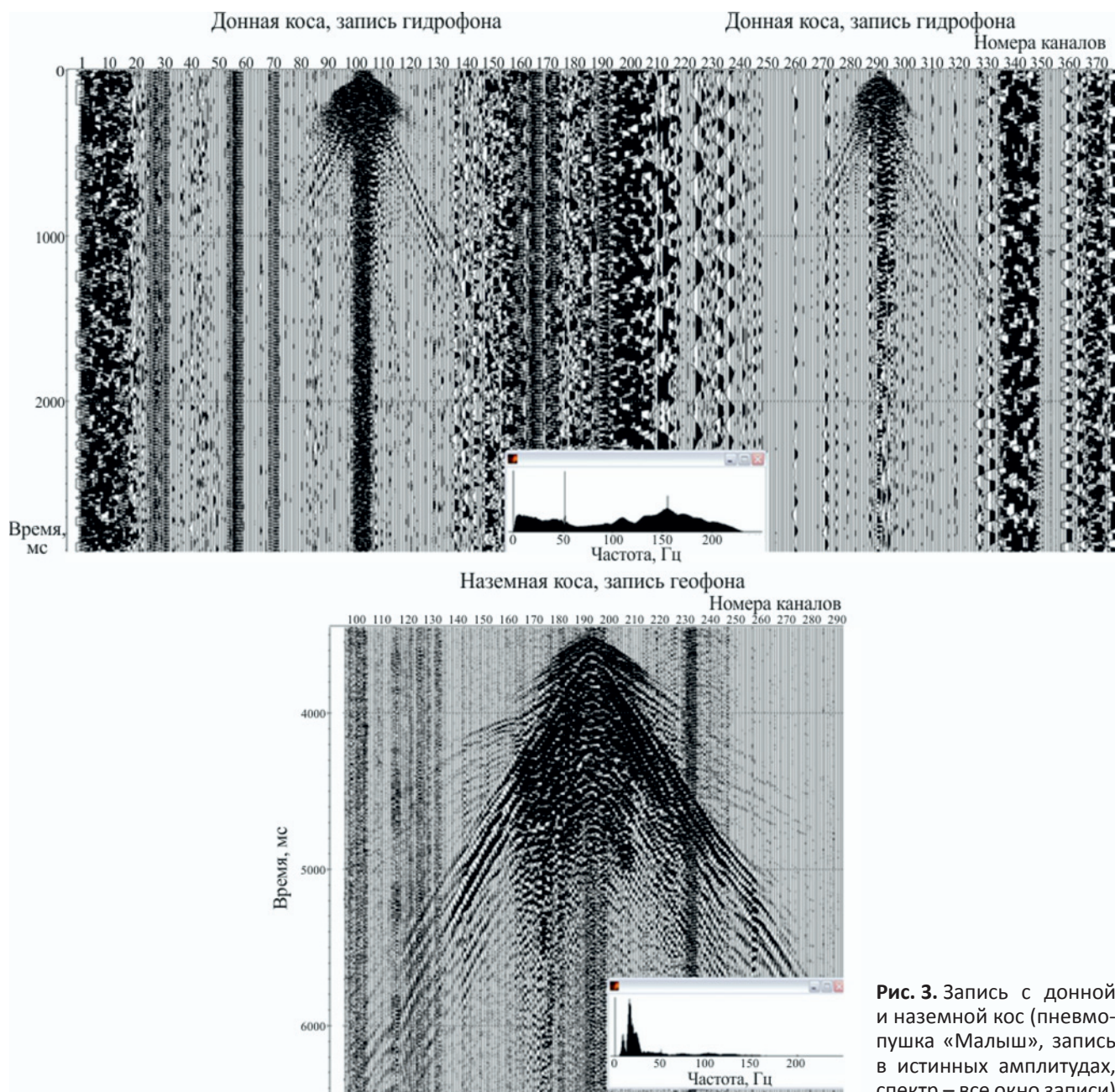


Рис. 3. Запись с донной и наземной кос (пневмопушка «Малыш», запись в истинных амплитудах, спектр – все окно записи)

которые имеют свои особенности и отличия от наземных. Особенности связаны прежде всего с технологией проведения полевых работ, нерегулярной системой наблюдения и орогидрографическими условиями, не характерными для наземных работ. Действительно, система наблюдений, как правило, обращенная: источник возбуждений, находящийся на судне, проходит вдоль фиксированной приемной расстановки, расположенной на берегу. Затем расстановка перемещается на новое место, обработку профиля проводят в обратном порядке. Временной интервал между пунктами возбуждения стараются выбирать так, чтобы звуковая волна от предыдущего воздействия не накладывалась на последующее. В то же время при выбранном временном интервале расстояние между ПВ оказывается непостоянным, так как зависит от скорости движения судна. Линии

приема и наблюдения в случае их расположения на берегу находятся на некоторой дистанции друг от друга, поэтому расстояние от пункта возбуждения до первого канала – величина переменная, зависящая от ширины русла и траектории судна-источника. Кратность такой системы наблюдения получается неравномерной, как и набор удалений в сейсмограммах общих средних точек. Линия наблюдения практически плоская, что естественным образом упрощает ВЧР и позволяет избежать проблем, связанных с пересчетом данных на линию приведения. Изгибы русла реки необходимо учитывать не только при обработке, но и при интерпретации данных, поскольку геологические структуры пересекаются линией профиля в различных направлениях. Свою специфику имеет и регистрируемое волновое поле, на которое влияют источник наблюдений, фон помех различного ха-

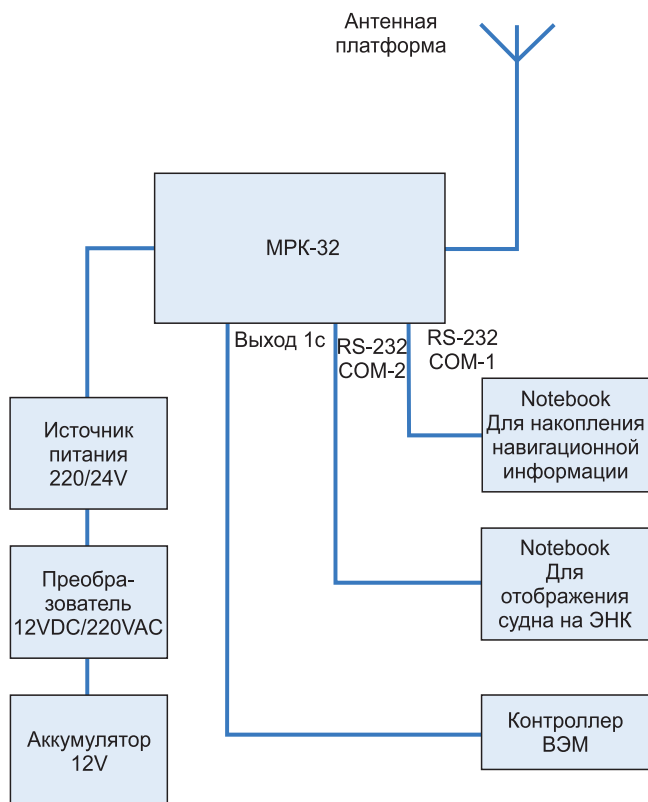


Рис. 4. Обобщенная структурная схема МРК



Рис. 5. Конструктивное размещение узлов МРК на речном судне

рактера (течение воды, движение судов), рельеф речного дна.

Все перечисленные особенности данных речных сейсморазведочных работ несвойственны традиционным наземным работам МОГТ 2D. А значит, и способы их обработки должны быть основаны на этой специфике и отличаться от стандартных.

Речной профиль представляет собой извилистую линию, что обусловлено траекторией русла реки. Вместо стандартного автоматического способа формирования сейсмограмм ОСТ необходимо выполнять бинирование по технологии слалом-про-

филя (crooked line binning). Траверс-линия, размеры (вдоль и поперек профиля) и форма бинов задаются обработчиком в интерактивном режиме с опорой на облако средних точек и положение пунктов возбуждения и приема. Существенное влияние на результат обработки оказывает ширина бина – размер площадки вкрест линии профиля. Срединные точки, попавшие в эту площадку, сформируют сейсмограмму ОСТ, которая в процессе суммирования создаст одну из трасс суммарного разреза. Исходя из этого, при выборе ширины бина обычно руководствуются общими геологическими представлениями о строении разреза, углах наклона границ, размерах зоны

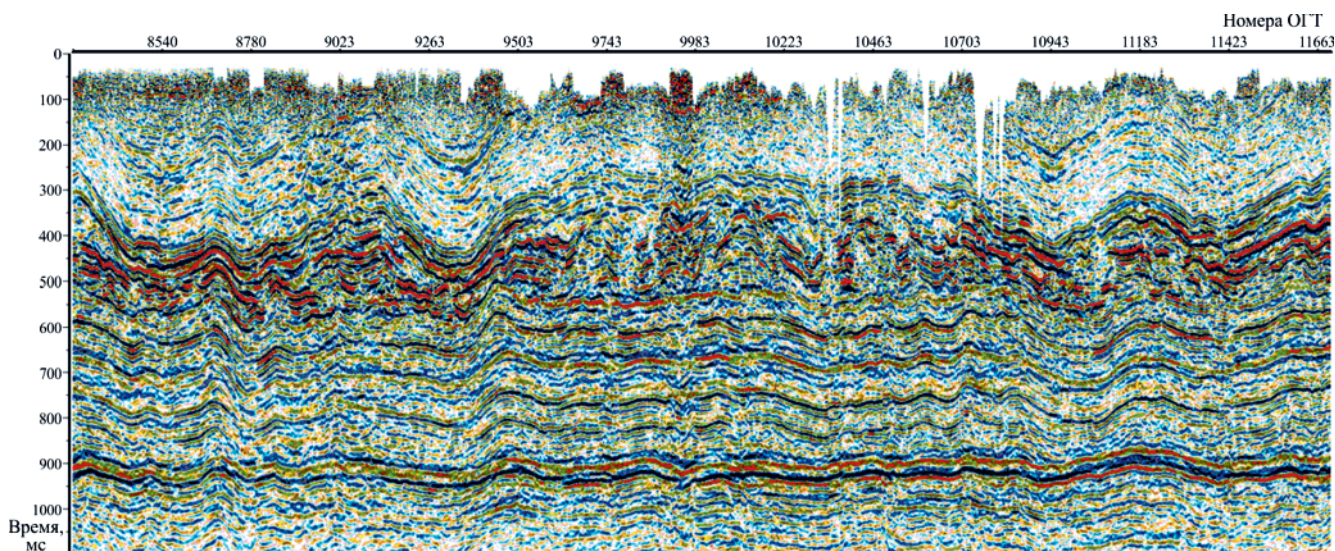


Рис. 6. Фрагмент окончательного временного разреза на р. Лена, полевые работы 2007 г.

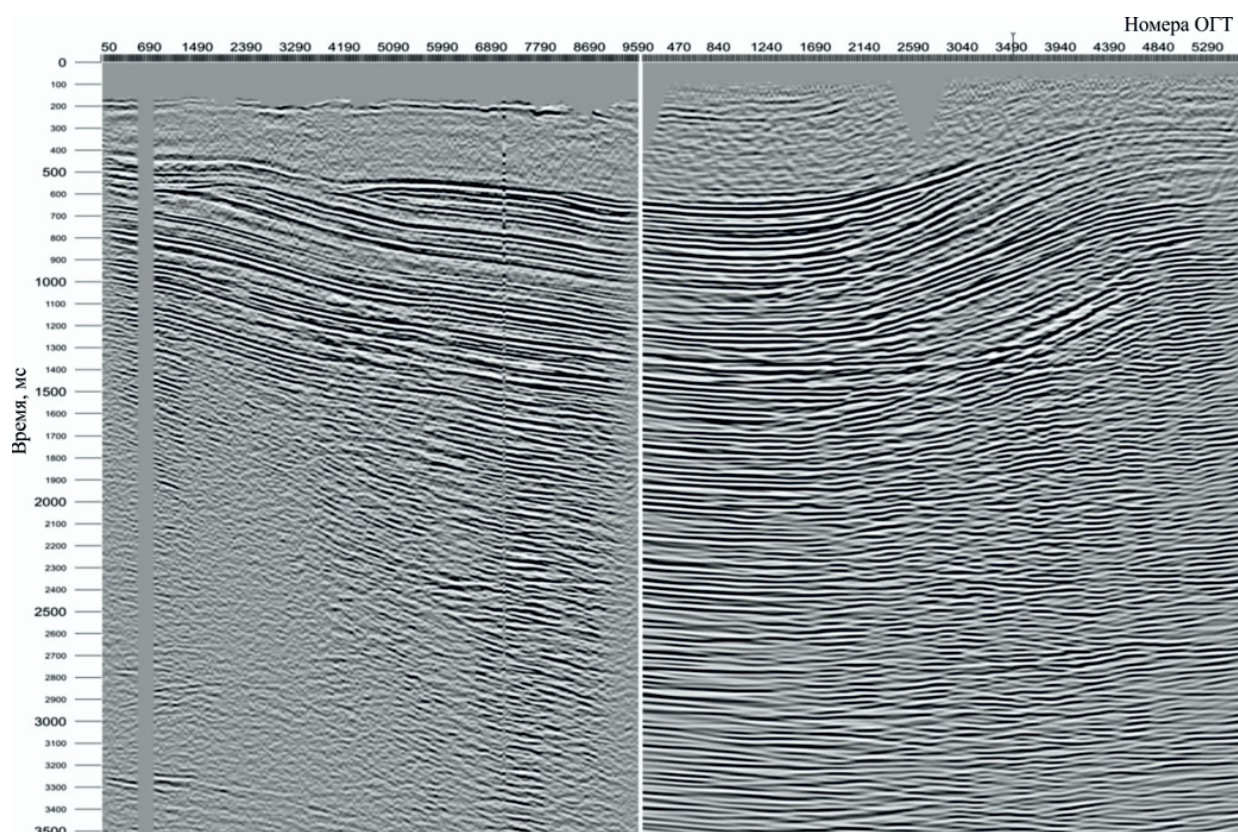


Рис. 7. Композитный разрез по р. Ангара (справа – работы 2008 г.) и наземному пр. 11 (слева)

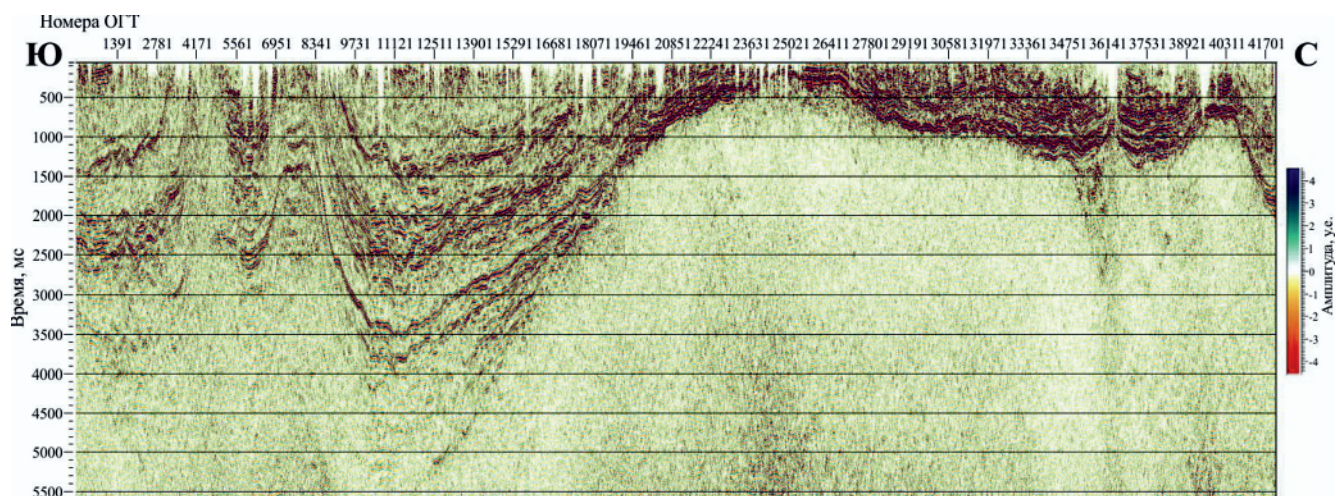


Рис. 8. Сейсмический разрез по профилю р. Лена (1050 км, 2019 г.)

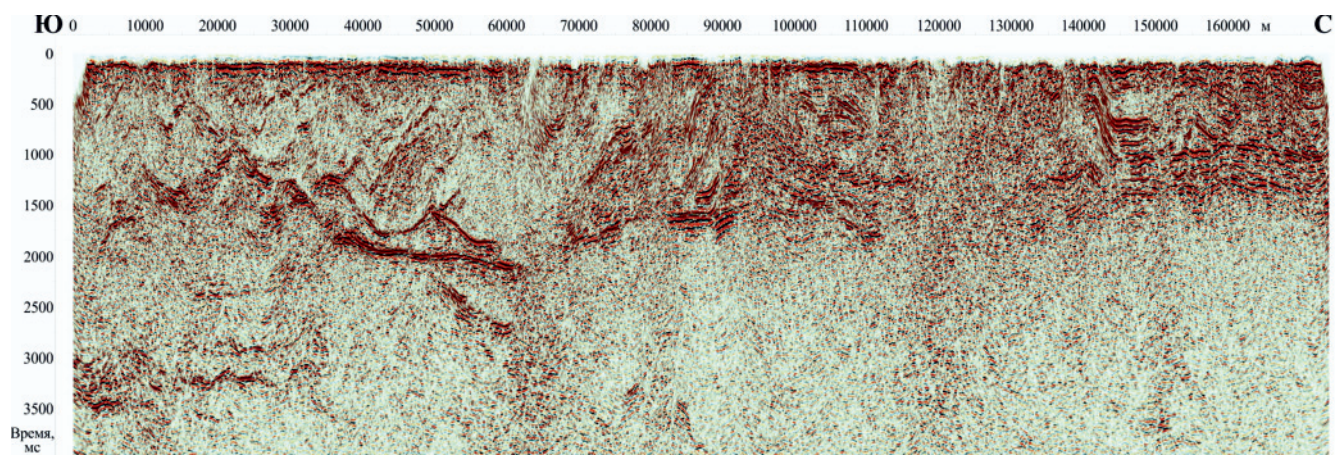


Рис. 9. Сейсмический разрез по р. Витим (170 км, 2019 г.)

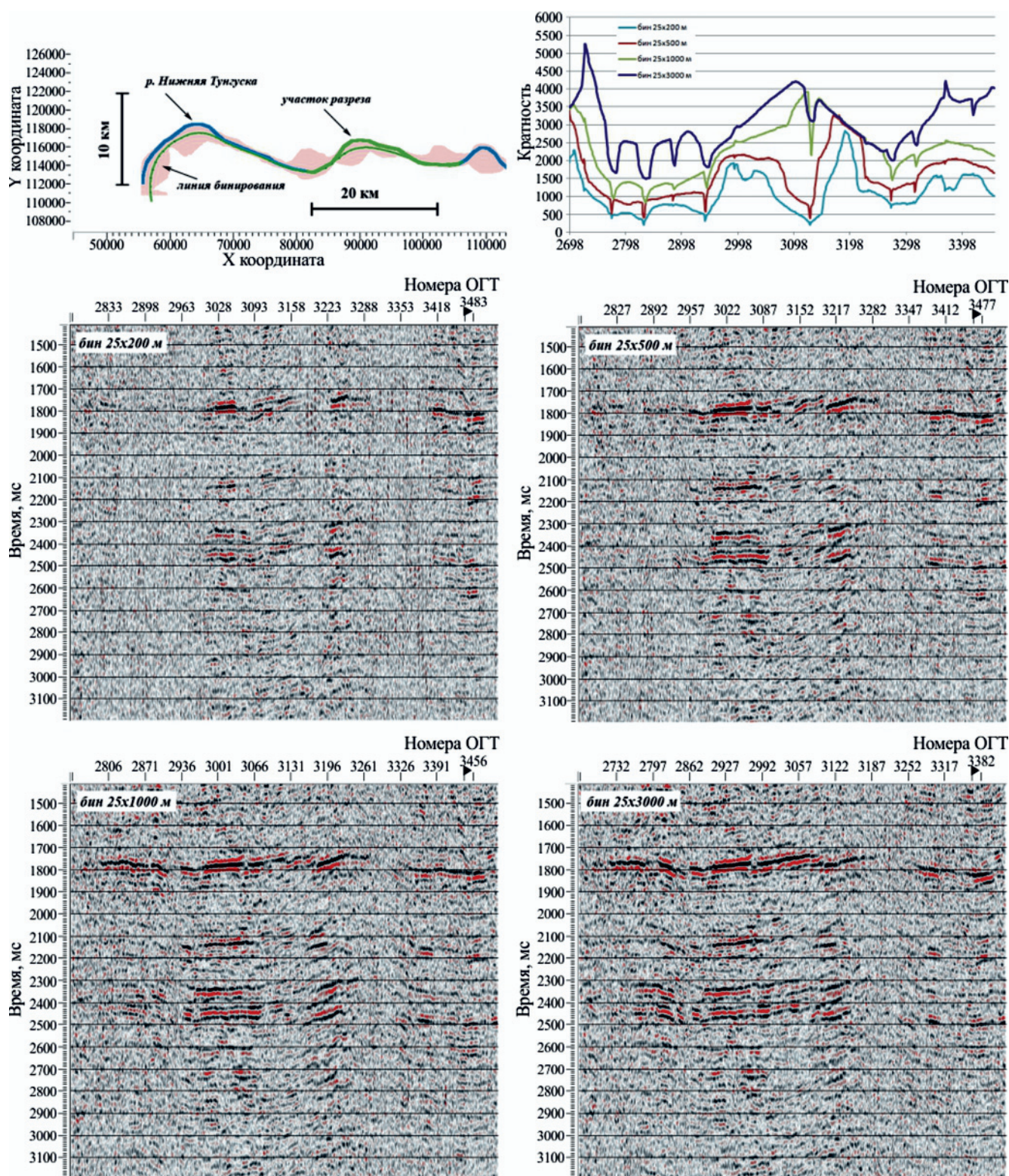


Рис. 10. Анализ влияния ширины бина на прослеживаемость основных горизонтов

Френеля для целевых горизонтов и результатами тестирования. На рис. 10 показан участок разреза по р. Нижняя Тунгуска, полученный при различной ширине бина. Хорошо видно, что для данного участка, характеризующегося пологим залеганием отражающих горизонтов, прослеживаемость основных отражений выше при размере бина 3 км. Такой бин охватывает все средние точки и обеспечивает максимально возможную кратность, при этом потери

разрешенности замечено не было. В условиях, когда отражающие горизонты залегают с большими углами наклона, результат может быть другой, поэтому необходимо тщательное тестирование этого параметра. В отдельных случаях при невозможности выбора единых параметров профиль может быть разбит на участки с разной шириной бина.

Технология проведения полевых работ характеризуется крайне нерегулярной системой

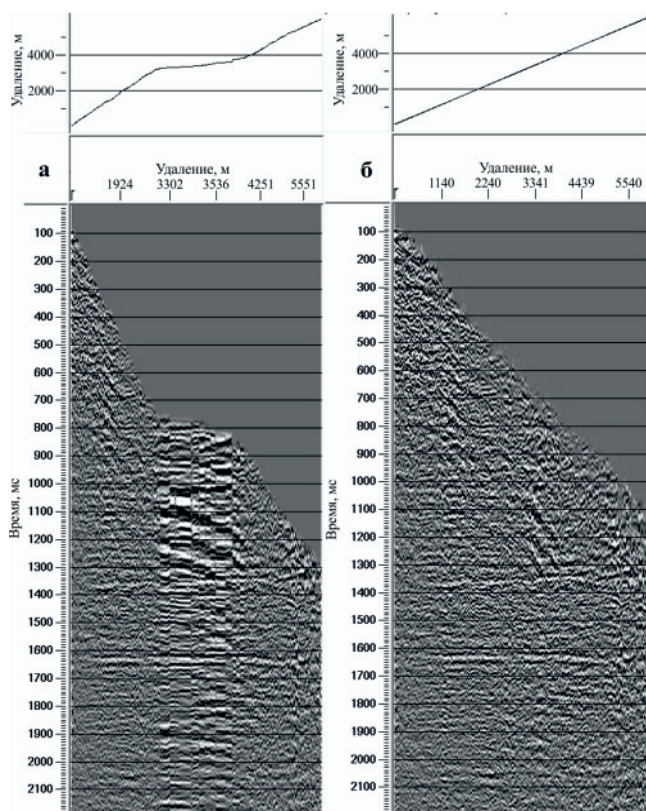


Рис. 11. Сейсмограмма ОСТ до выполнения регуляризации (а) и после трехпроходной регуляризации (б)

наблюдений. Расстояние между трассами в сейсмограммах ОСТ и ОПП речных профилей варьируется в очень широких пределах (рис. 11, а). Кратность может изменяться скачкообразно и на ряде участков быть избыточной. На участках, где набор данных сильно разрежен, наблюдается эффект пространственного аляйсинга сейсмических данных, а внезапное чрезмерное сгущение трасс ведет к возникновению специфических помех на суммарных разрезах. Такая нерегулярность создает проблемы для процедур обработки. Среди них можно назвать миграцию, преобразование Радона, фильтрацию в F-K области – достаточно широкий класс процедур, используемых при обработке. Для выравнивания расстояний и гармонизации кратности часто требуется нетривиальный граф регуляризации, состоящий из нескольких проходов, поскольку должны быть решены сразу несколько задач: близко стоящие трассы должны быть объединены, недостающие удаления по возможности интерполированы, трассы должны располагаться на заданной регулярной сетке (набор

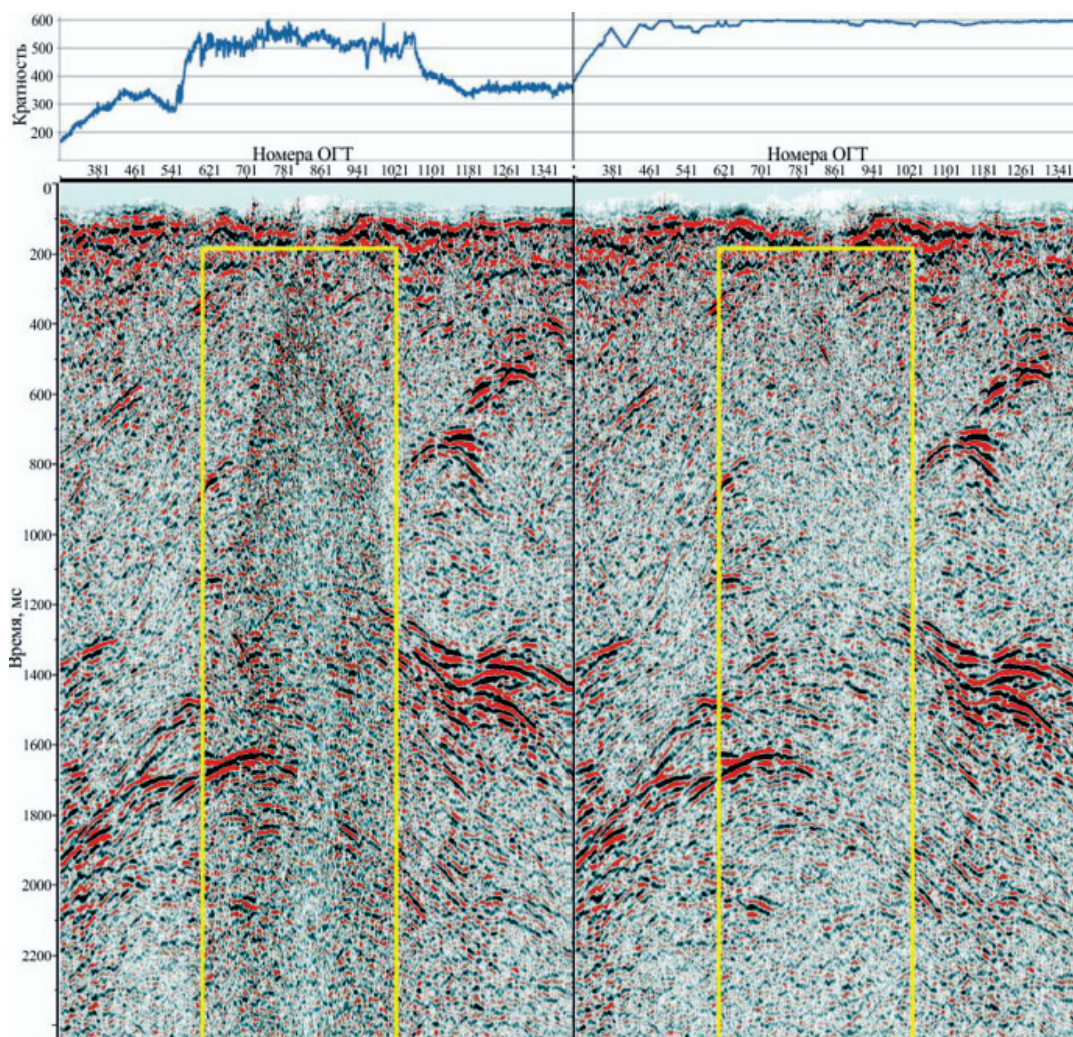


Рис. 12. Участок временного разреза по р. Витим и график кратности (сверху) (кратность выровнена, помехи устранены)

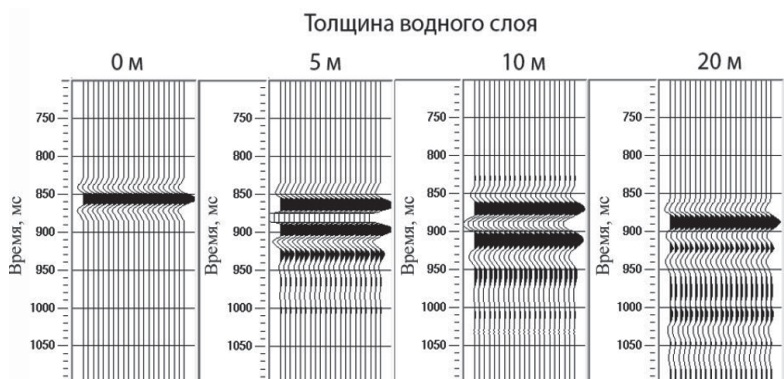


Рис. 13. Моделирование волнового поля отраженных волн при возбуждении источника, размещенного в водных слоях различной толщины

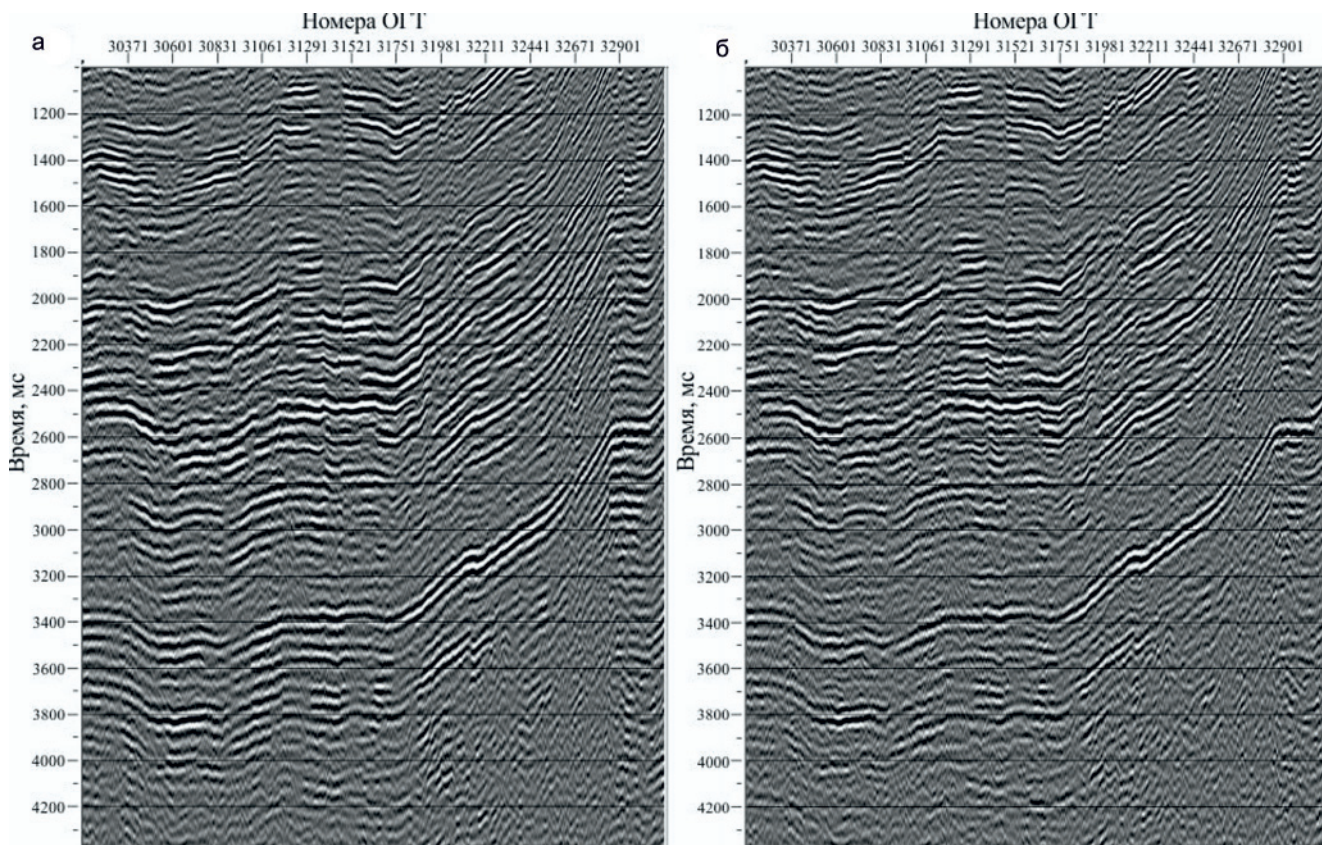


Рис. 14. Пример подавления фона ревербераций процедурой SRME: а – до подавления; б – после подавления (профиль в нижнем течении р. Лена)

удалений в каждой ОСТ по возможности одинаков), координаты средней точки – в центре бина (см. рис. 11, б). После корректно выполненной регуляризации на временном разрезе отсутствуют помехи, связанные с расфазировкой отраженных волн, кроме того, происходит выравнивание кратности, что благоприятно сказывается на амплитудах (рис. 12).

Зарегистрированные сейсмограммы речных профилей обычно имеют низкое соотношение сигнал/помеха, обусловленное высоким уровнем шумов природного и техногенного характера в сейсмической полосе частот (течение воды, движение судов (двигательные установки, гребные винты), электрические помехи, поверхностные волны-помехи, реверберации и кратные волны, связанные с наличием водного слоя и др.). По этой причине речные данные обычно требуют более сложного

графа подавления помех, чем это принято в наземной сейсморазведке.

Следует остановиться на эффекте реверберации, или многократном переотражении сигнала, которое возникает на кровле и подошве водного слоя. Моделирование, выполненное в пакете Tesselal (Украина, Канада), показывает наличие волн-спутников различной периодичности в зависимости от толщины водного слоя (рис. 13).

Подавление волн-спутников в обработке может быть осуществлено средствами предсказывающей деконволюции или алгоритмом SRME, который подавляет кратные волны, связанные со свободной поверхностью, и широко используется при обработке морских данных. В результате применения процедуры SRME при обработке профиля в нижнем течении р. Лена волновое поле существенно упрощается за счет удаления ложных осей синфазности (рис. 14).

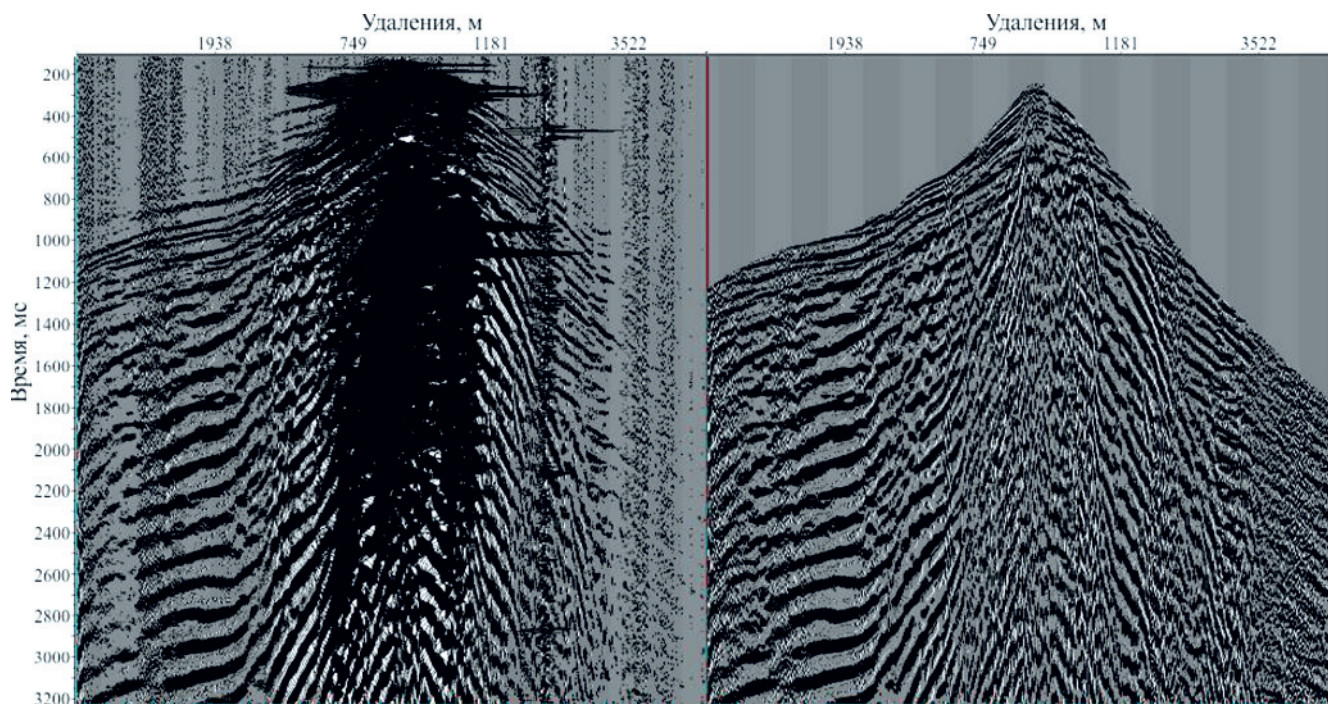


Рис. 15. Сейсмограмма до и после подавления высокоамплитудных помех (профиль на р. Нижняя Тунгуска)

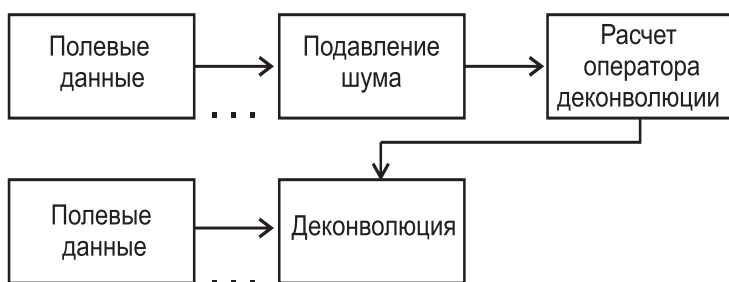


Рис. 16. Схема выполнения деконволюции

В настоящее время для наземных данных общепринят подход, когда перед деконволюцией подавляется основной фон высокоамплитудных помех. Предполагается, что это позволит поверхностно-согласованной деконволюции более корректно выполнить оценку импульса. После деконволюции данные подвергаются дальнейшей одноканальной и многоканальной фильтрации помех. Однако даже после тщательного подавления высокоамплитудных помех перед деконволюцией на сейсмограммах речных профилей все еще практически визуально неразличимы отраженные волны, поскольку их перекрывает мощный фон поверхностных волн-помех (рис. 15).

Учитывая этот факт, был опробован альтернативный подход к выполнению деконволюции (рис. 16):

- 1) к исходным данным применяется компенсация амплитуд за сферическое расхождение фронта волны;
- 2) выполняется вычитание основного фона высокоамплитудных помех без искажения формы сигнала, после этого получаем набор данных «А»;
- 3) осуществляется более жесткое вычитание высокоамплитудных помех по сейсмограммам

в различных сортировках, применяются двумерные фильтры подавления помех линейного типа, получаем набор «Б»;

- 4) производится расчет оператора деконволюции с использованием набора «Б», оператор сохраняется в виде набора данных;

- 5) рассчитанный оператор применяется к набору «А»;

- 6) подавление различных помех выполняется заново.

Такой подход позволяет осуществить оценку импульса по свободным от большинства помех данным и применить обратный фильтр к данным с неискаженной формой сигнала. После выполнения деконволюции применяется граф обработки, настроенный на подавление всех оставшихся регулярных и нерегулярных помех.

Обработка речных данных с учетом изложенных подходов существенно повышает прослеживаемость отражающих горизонтов, информативность и геологическую эффективность речных маршрутов, пролегающих в различных сейсмогеологических условиях. Это подтверждают опубликованные и фоновые результаты работ на реках Нижняя Тунгуска и ее притоках [4, 7], Лена (в верхнем, среднем и нижнем течениях), Витим.

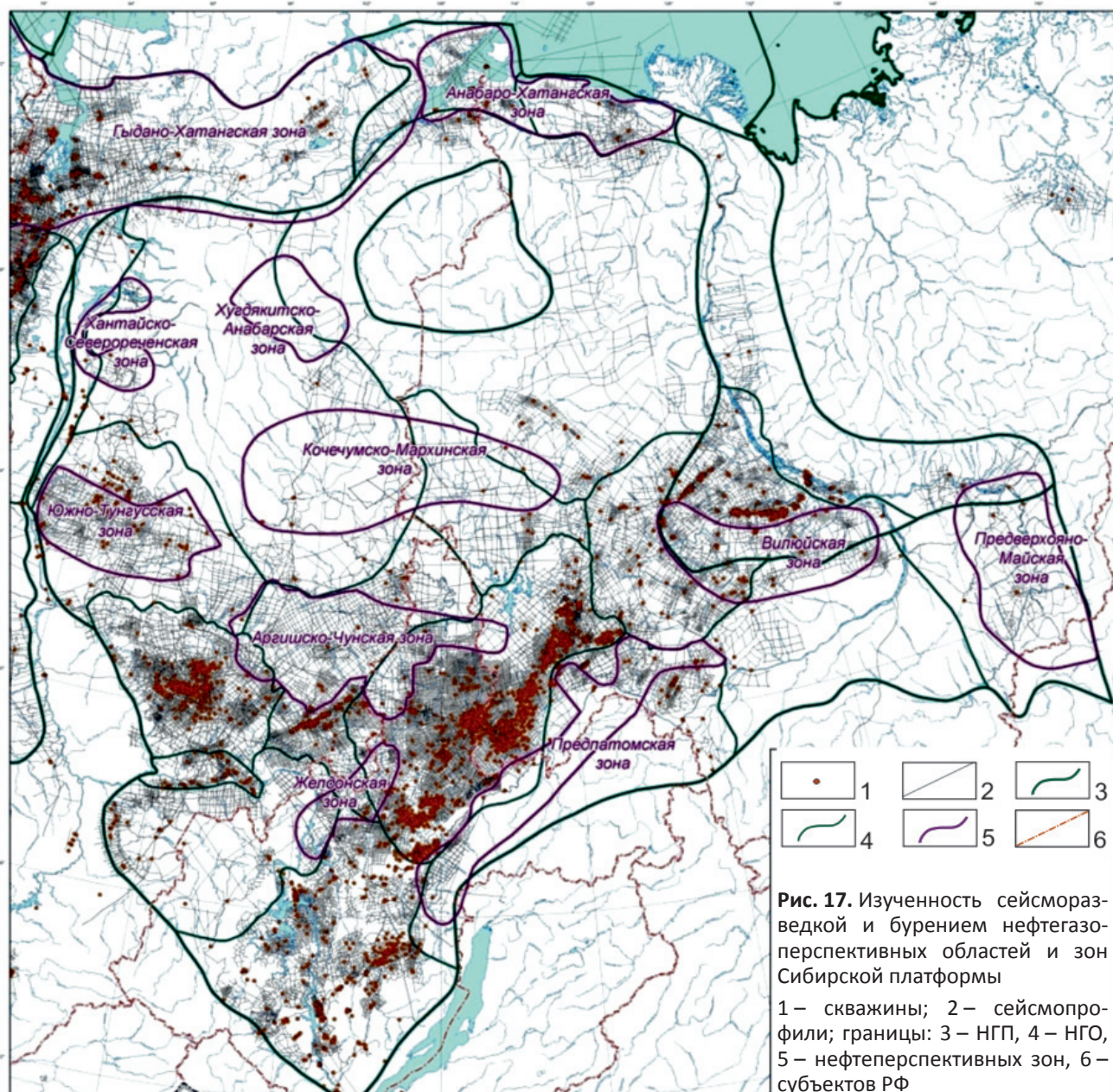


Рис. 17. Изученность сейсморазведкой и бурением нефтегазоперспективных областей и зон Сибирской платформы

1 – скважины; 2 – сейсмопрофили; границы: 3 – НГП, 4 – НГО, 5 – нефтеперспективных зон, 6 – субъектов РФ

В заключение отметим, что высокая геологическая эффективность речной сейсморазведки в совокупности с почти двукратным (относительно обычных наземных работ МОГТ) снижением стоимости 1 пог. км сейсмического профиля позволяет рекомендовать развертывание таких работ на реках северной части Тунгусской синеклизы – территории с очень низкой изученностью нефтегазоперспективных уровней (рис. 17), где на балансе числится четверть всех ресурсов углеводородов Сибирской платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брыксин А. А., Селезнев В. С., Лисейкин А. В. Развитие речных сейсморазведочных технологий // Геофизические методы исследования земной коры: матер. Всерос. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения акад. Н. Н. Пузырева (Новоси-

бирск, 8–13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2014. – С. 11–15.

2. Детальные сейсмические исследования на акваториях и в транзитных (вода-суша) зонах / В. С. Селезнев, В. М. Соловьев, А. П. Сысоев и др. // Пути повышения эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия): матер. Всерос. конф. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2006. – С. 212–215.

3. Кокорин В. И., Фатеев Ю. Л., Гарин Е. Н. Опыт создания спутниковой аппаратуры ГЛОНАСС/GPS для топопривязки и ориентирования мобильных радиолокационных станций // Радиопромышленность. – 2008. – № 5. – С. 39–46.

4. Новые данные о строении Туруханской зоны дислокаций на основе комплексной интерпретации речных сейсморазведочных работ и геологических

маршрутов / А. С. Ефимов, М. Ю. Смирнов, Г. Д. Ухлова и др. // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 3–4. – С. 553–564.

5. **Некоторые** методические особенности применения геофизического комплекса при изучении геологического строения Восточно-Сибирского региона / М. Ю. Смирнов, Г. Д. Ухлова, Е. В. Мосягин, В. Н. Беспечный // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2018. – № 2. – С. 65–76.

6. **Речная** сейсморазведка на востоке России / В. С. Селезнев, В. М. Соловьев, А. П. Сысоев и др. // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: сб. матер. науч.-практ. конф. – Красноярск: КНИИГиМС, 2007. – С. 143–146.

7. **Смирнов М. Ю., Ухлова Г. Д., Мосягин Е. В.** Новый сейсмический речной профиль в системе региональной сети каркасных профилей Восточной Сибири // Природные ресурсы Красноярского края. – 2015. – № 25. – С. 28–30.

REFERENCES

1. Bryksin A.A., Seleznev V.S., Liseikin A.V. [Development of river seismic prospecting]. *Geofizicheskiye metody issledovaniya zemnoy kory: Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.N.Puzyreva (Novosibirsk, 8–13 dekabrya 2014 g.)* [Geophysical methods for studying the Earth's crust: Proceedings of the All-Russian conference devoted to the 100th anniversary of Academician N.N.Puzyrev (Novosibirsk, 8–13 December 2014)]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2014, pp. 11–15. (In Russ.).

2. Seleznev V.S., Solovyev V.M., Sysoeva A.P., et al. [Detailed seismic surveys in water areas and transition

(water-land) zones. Ways to improve the efficiency of oil and gas exploration in East Siberia and the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Materialy Vseros. konf.* [Materials of All-Russian Conference]. Novosibirsk, SNIIGiMS, 2006, pp. 212–215. (In Russ.).

3. Kokorin V.I., Fateev Yu.L., Garin E.N. [Experience in the engineering of GLONASS/GPS satellite equipment for the topography and orientation of mobile radar stations]. *Radiopromyshlennost – Radio industry*, 2008, no. 5, pp. 39–46. (In Russ.).

4. Efimov A.S., Smirnov M.Yu., Ukhlova G.D., et al. [New data on the structure of the Turukhan zone of deformation from the results of seismic survey and geological traverses]. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 451–460.

5. Smirnov M.Yu., Ukhlova G.D., Mosyagin E.V., Bespechnyy V.N. [Some methodological peculiarities of application of the geophysical complex in the study of the geological structure of the East Siberian Region]. *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2018, no. 2, pp. 65–76. (In Russ.).

6. Seleznev V.S., Solovyev V.M., Sysoev A.P., et al. [Water shooting in the East of Russia. Prospects for the development of oil and gas production complex of the Krasnoyarsk Territory]. *Sbornik materialov nauch.-prakt. konf.* [Proceeding of Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS, 2007, pp. 143–146. (In Russ.).

7. Smirnov M.Yu., Ukhlova G.D., Mosyagin E.V. [New seismic river profile in the system of regional network of wireframe profiles of East Siberia]. *Prirodnyye resursy Krasnoyarskogo kraya – Natural Resources of Krasnoyarsk Territory*, 2015, no. 25, pp. 28–30. (In Russ.).

© Е. В. Мосягин, А. С. Ефимов, 2021