

Санкт-Петербургский государственный университет

ЕГОРОВА Наталия Владимировна

Выпускная квалификационная работа

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕЗО-КАЙНОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ДНА
ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ МОВ-ОГТ И НСП**

Основная образовательная программа магистратуры

«Геология»

Профиль «Геофизика»

Научный руководитель: к.ф.-м.н.,
доцент САКУЛИНА Тамара Сергеевна

Рецензент:
эксперт ООО «Газпромнефть НТЦ»
БУТОРИН Александр Васильевич

Санкт-Петербург

2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА БАЙКАЛ.....	5
1.1. Изученность района работ.....	5
1.2. Физико-географический очерк.....	6
1.3. Особенности геологического строения.....	8
1.3.1. Геологическое строение Прибайкалья.....	10
1.3.2. Геологическое строение Байкальской котловины.....	15
1.4. Газовые гидраты озера Байкал	22
2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ.....	26
3. ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	28
3.1. Граф обработки сейсмических данных.....	28
3.2. Переобработка сейсмических данных	30
3.2.1. Метод «Сеймостратиграфического суммирования»	31
3.2.2. Построение разрезов методом RGB.....	35
4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ	41
4.1. Стратификация горизонтов	41
4.2. Прослеживание горизонтов.....	43
4.3. Построение структурных карт и карт мощностей.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
Список литературы	59

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал - центральное звено одной из наиболее крупных зон активного континентального рифтогенеза, представляющего собой потенциальный аналог распада суперконтинента на ранних стадиях его развития. В предшествующие десятилетия на озере был выполнен большой объем геолого-геофизических работ. Однако достоверные сведения, которые могли бы дать однозначный ответ о структуре, мощности и возрасте осадочного чехла и фундамента Байкальской котловины, отсутствуют, а результаты геофизических исследований не однозначны и согласуются, чаще всего, только в наиболее крупных вопросах. Кроме того, в последнее время в связи с проблемой глобальных изменений природной среды и климата возрос интерес к детальному изучению газовых гидратов Байкала, оказывающих значительное влияние на экологическую обстановку района.

Решающее значение при изучении геологического строения Байкальской впадины и в вопросах прогноза и поиска газогидратов имеют сейсмические данные, прежде всего полученные в 1992 г. методом отраженных волн по системе наблюдений с многократными перекрытиями (МОВ-ОГТ) и по системе непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП). Результаты этих работ после применения современных способов обработки и интерпретации представлены в настоящей магистерской диссертации.

Данная работа выполнена в ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках проекта «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории» в соответствии с федеральной программой «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012 - 2020 годы».

Целью работы является уточнение строения мезозой-кайнозойского осадочного чехла Байкальской котловины и обнаружение углеводородных проявлений для оценки экологического состояния Байкальской природной территории на основе сейсмических данных МОВ-ОГТ и НСП.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- Выполнить переобработку материалов МОВ-ОГТ (1992 г.) и НСП (1992 г.) в системе CubeTechnology;
- Провести интерпретацию сейсмических данных в системе CubeTechnology;

- Построить структурные карты основных отражающих горизонтов и карты мощностей, включая структурную карту подошвы и карту мощности газогидратного слоя;
- Выполнить оценку экологического состояния Байкальской природной территории.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА БАЙКАЛ

1.1. Изученность района работ

Район Байкала является одной из наиболее хорошо изученных структур подобного рода на Земле с точки зрения тектоники, геофизических полей, напряженного состояния земной коры и сейсмичности.

Первые сейсмоакустические исследования на акватории озера Байкал были проведены в 1977 - 1982 гг. специалистами Московского государственного университета, Института земной коры СО РАН и Института океанологии РАН. Серия сейсмоакустических профилей была сконцентрирована преимущественно в Северной котловине Байкала. В период с 1982 по 1988 г. сейсмоакустические работы на Байкале были приостановлены и получили продолжение только в 1989 г. Лимнологическим институтом СО РАН, Геологическим институтом РАН и Гамбургским университетом. Сейсмоакустические профили 1989 г. располагались главным образом в южной части озера (Леви, 1995; Бухаров, 1996). Летом этого же года геофизиками Южного филиала Института океанологии Академии наук СССР было собрано около 1500 км сейсмических профилей с рабочей частотой 10 Гц (Lee, 1996).

В 1991 - 1992 гг. сотрудниками Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН при участии Института земной коры СО РАН было проведено одноканальное сейсмоакустическое профилирование. Профиля располагались так, чтобы заполнить образовавшиеся пустые «пятна» после ранее проведенных исследований и покрыли достаточно равномерной сеткой Северную котловину Байкала. Параллельно в 1990 - 1992 гг. около 3600 км сейсмоакустических профилей с высоким разрешением было выполнено Лимнологическим институтом СО РАН, Институтом океанологии РАН и Геологической службой США (Леви, 1995). Одними из важнейших работ 1992 г., проведенных при сотрудничестве американских и российских ученых, являются многоканальное сейсмическое профилирование (2200 км профилей) и более 500 км профилей методом ГСЗ (Зоненшайн, 1992; Гольмшток, 1995).

В 2015 - 2017 гг. сотрудниками Иркутского национального исследовательского технического университета и Российского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского на акватории озера были проведены многочисленные исследования методом непрерывного сейсмоакустического профилирования для изучения верхней части разреза.

1.2. Физико-географический очерк

Озеро Байкал находится в южной части Восточной Сибири, на границе Иркутской области и Республики Бурятия. Озеро вытянуто на 620 км с юго-запада на северо-восток и представляет собой гигантский полумесяц, изогнутый в плане в соответствии с конфигурацией края древней Сибирской платформы. Ширина Байкала варьирует от 24 км (в районе дельты реки Селенги) до максимальной отметки в 79 км против устья р. Баргузин (рис. 1). При сопоставлении водоема с уровнем моря, Байкал расположен на высоте 455 метров. Длина береговой линии составляет около 2000 км. Самые крупные из притоков - Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин.

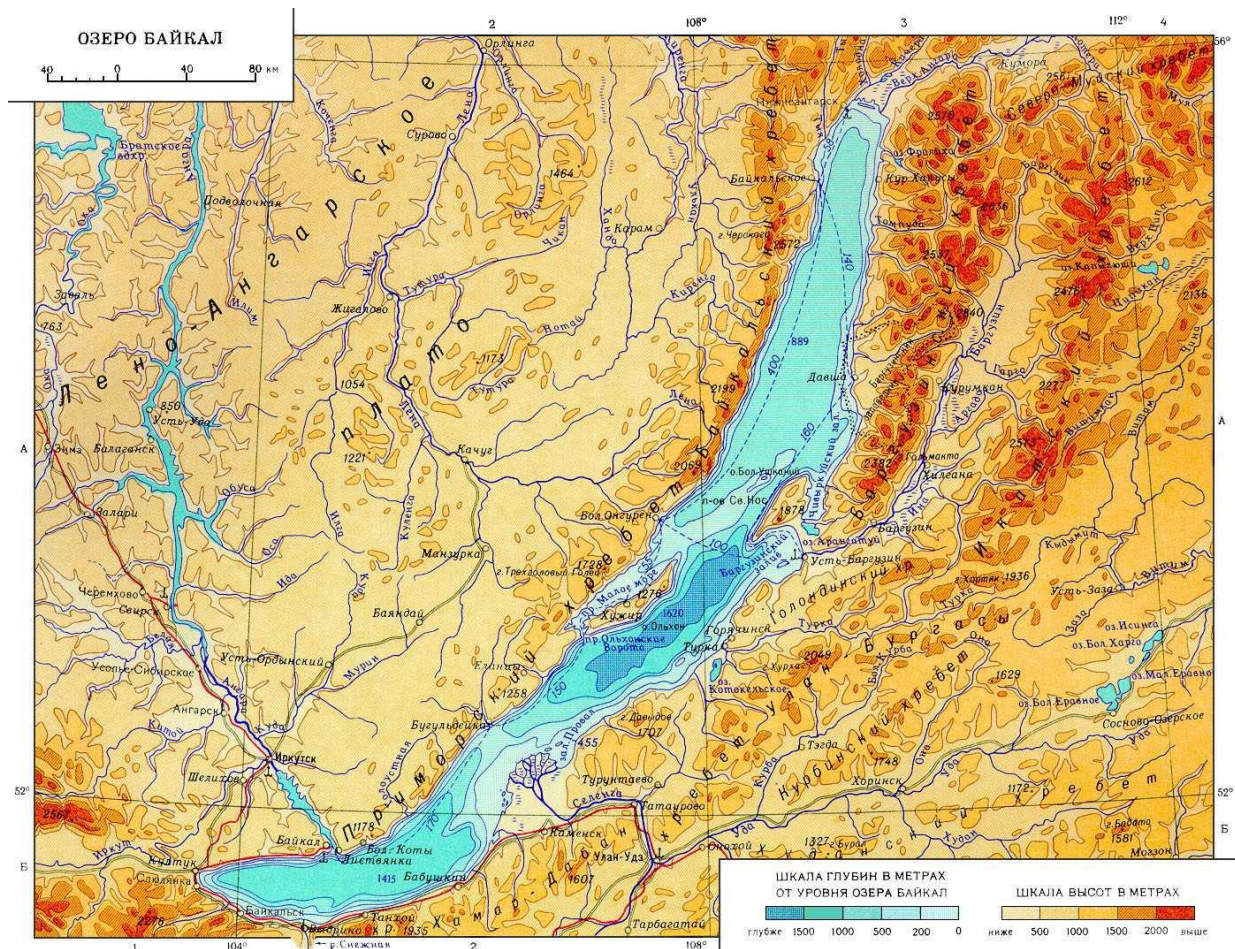


Рисунок 1 Физико-географическая карта района озера Байкал и его окрестностей (dic.academic.ru)

Озеро Байкал расположено в своеобразной котловине, окружённой со всех сторон молодыми горными цепями, входящими в состав Саяно-Байкальского станового нагорья. Вдоль восточного борта Южного Байкала возвышается хребет Хамар-Дабан, имеющий максимальную высоту 2374 м (г. Хан-Ула). Северо-восточнее находится относительно невысокий хребет Улан-Бургасы, от которого отклоняется хребет

Морской, расположенный непосредственно вдоль берега. Восточный берег северной части Байкала окаймлен Баргузинским хребтом с максимальными абсолютными отметками около 2800 м (Логачев, 1974; Беркин, 2009).

Вдоль северного борта южной и центральной частей Байкала тянется Приморский хребет (абсолютная высота до 1180 м). В районе устья реки Бугульдейки от него отклоняется горная цепь, переходящая в остров Ольхон, который является самым крупным на Байкале. С северо-западной стороны Байкальской котловины возвышается Байкальский хребет (наивысшая точка 2572 м) (Голубев, 1982).

В целом горное обрамление западного побережья Байкальской впадины характеризуется структурной цельностью и значительной крутизной склонов, что свидетельствует о генетическом единстве входящих в него хребтов. По морфоструктурному характеру данные хребты относятся к наклонным горстам, западный склон которых относительно длинный и пологий, а восточный резко обрывается, что определяется его приуроченностью к зоне Обручевского сброса.

Особенностью восточного побережья Байкала является значительно меньшая крутизна склонов, широкая шельфовая зона и диагональное положение продольных осей горных хребтов по отношению к береговой линии. Пониженные участки рельефа в межгорных стыках заняты крупными речными долинами. В крайней юго-восточной части озера котловина ограничена протяженной зоной сброса Черского (Беркин, 2009).

Рельеф дна Байкала чрезвычайно сложный. Вдоль всего побережья озера в большей или меньшей степени развиты прибрежные мелководья (шельфы) и подводные склоны; проявлено ложе трех основных котловин: Северной, Центральной и Южной (Ламакин, 1968; Зоненшайн, 1992). Асимметрия Байкала, выраженная в крутизне противоположных берегов, имеет свое продолжение и в подводной части. Такая асимметрия особо выражена в Южной и Средней котловинах озера (рис. 2), где западные борта впадины существенно круче восточных (Батиметрическая ..., 2006).

Центральная котловина наиболее глубокая (до 1642 м). С севера ее ограничивает подводный Академический хребет, имеющий протяженность около 100 км, с юга - Бугульдейско-Селенгинская перемычка, образованная в большей мере осадками, выносимыми самой крупной впадающей в Байкал рекой Селенгой. Максимальные глубины в Северной котловине смещены относительно ее осевой части в западном направлении и не превышают 900 м (Голубев, 1982; Зоненшайн, 1992). Для Южной котловины также отмечено увеличение глубины к западному берегу (наибольшая глубина около 1420 м) (Крылов, 1995; Беркин, 2009).

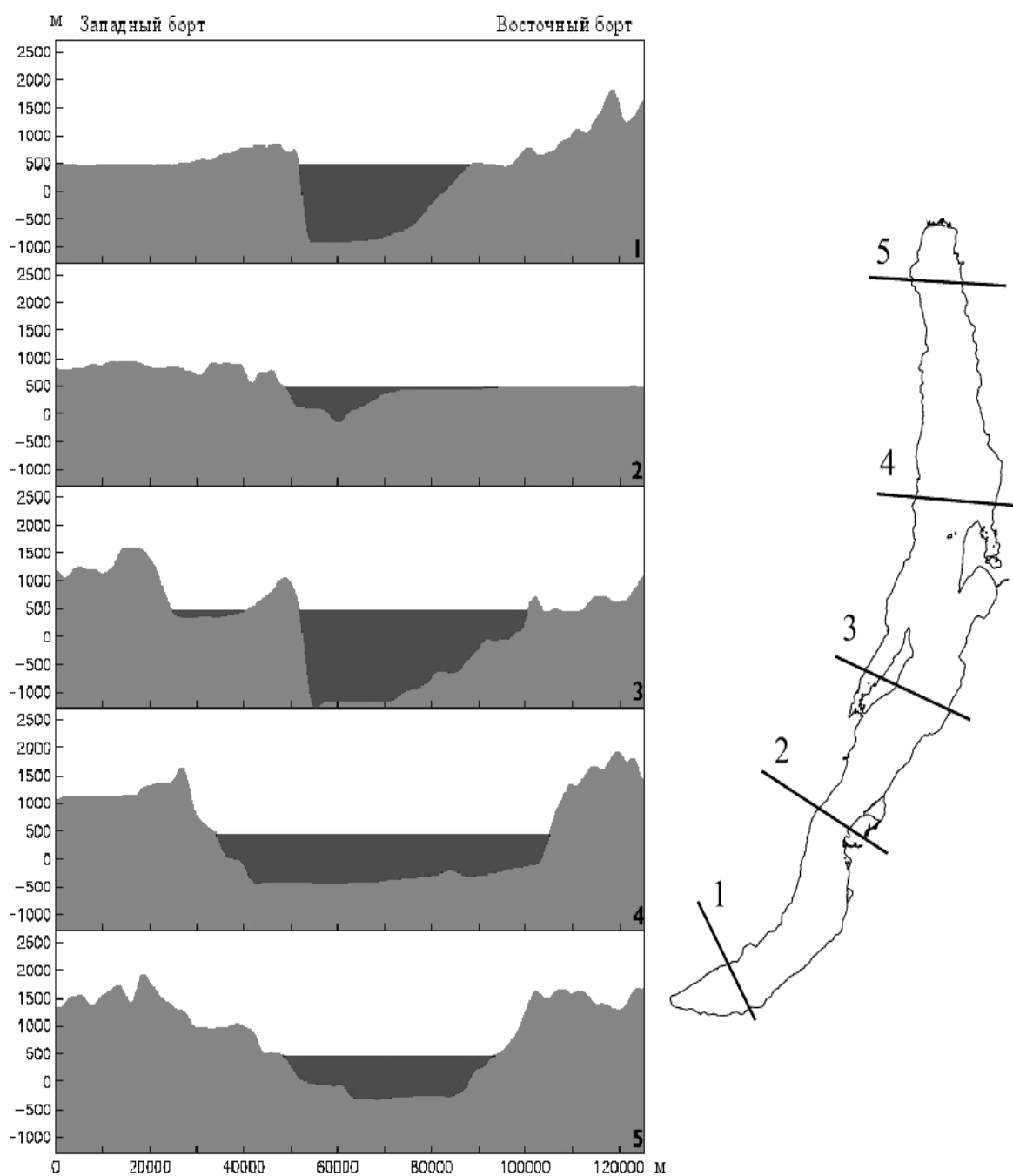


Рисунок 2 Схематичные поперечные профили через озеро Байкал
(Батиметрическая..., 2006)

1.3. Особенности геологического строения

Байкальская территория является крупнейшей активной Евразийской рифтовой системой (рис. 3), которая представляет собой аналог потенциального распада суперконтинента и является своеобразной природной лабораторией для наблюдения ранних стадий континентального рифтогенеза (Brink, 2002).

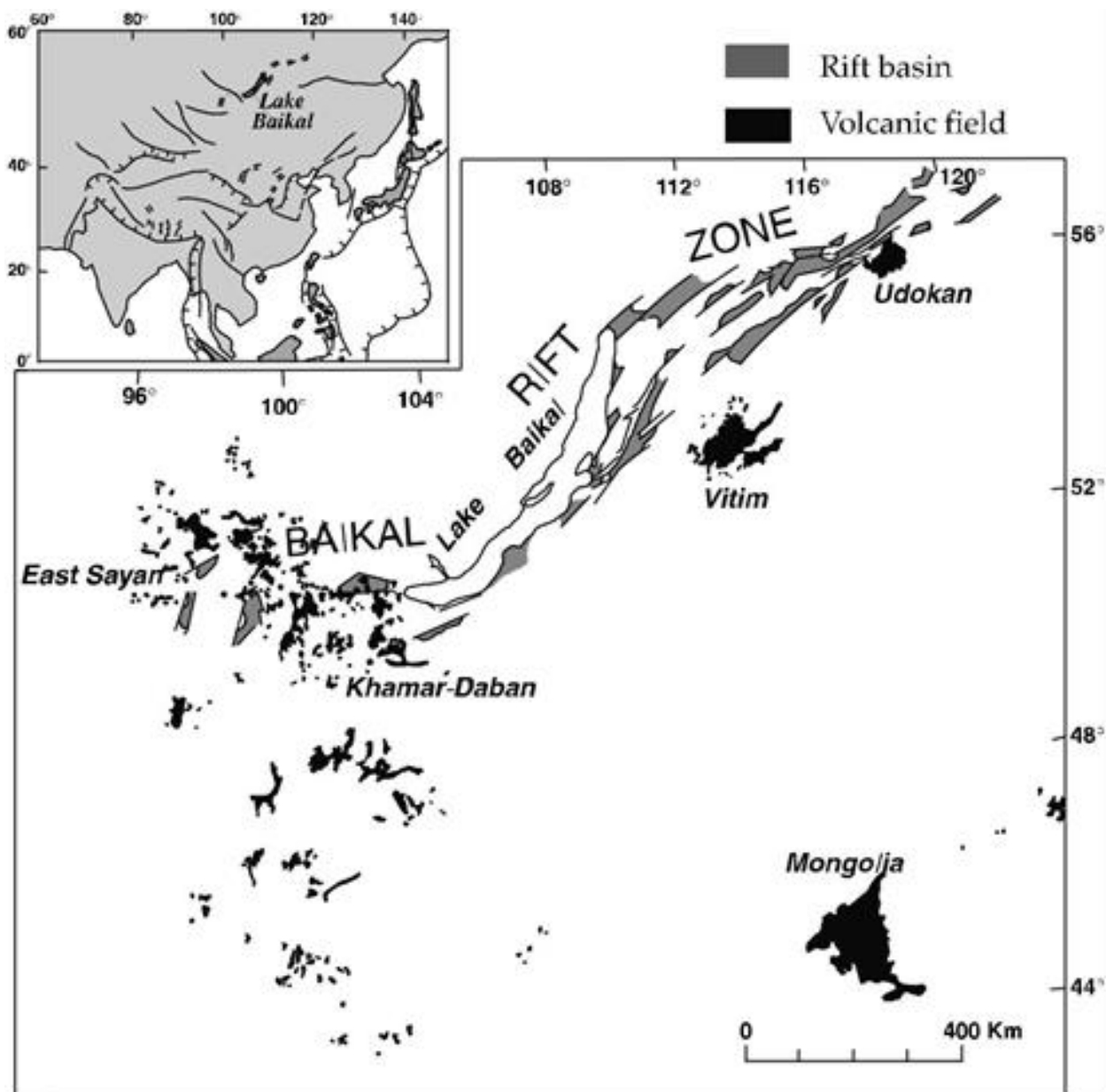


Рисунок 3 Расположение бассейнов, входящих в Байкальскую рифтовую систему (Kiselev, 1987) с изменениями (Brink, 2002)

Возраст рифта определяется возрастом древнейших синрифтовых отложений. Наиболее широко распространено мнение о олигоцен-миоценовом возрасте Байкальского рифта, предполагающее двухэтапную историю его развития: ранне- и позднеорогенный этапы [Базаров, 1986; Hutchinson, 1993, 1995; Zonenshain, 1995; Казьмин, 1995; Mashchuk, 2012; Рассказов, 2014]. Однако эти положения не совсем согласуются с наблюдаемыми геологическими особенностями района и противоречат результатам реконструкции полей палеонапряжений [Delvaux, 1997]. По последним представлениям древнейшие отложения Байкальской впадины определены как верхнемеловые (60 - 70 млн лет), что наиболее полно соответствует имеющимся геолого-геофизическим данным (Mats, 1993; Логачев, 2003; Мац, 2012, 2015).

По данной возрастной модели выделяется три этапа формирования Байкальского рифта, которые характеризуются особыми геодинамическими обстановками и механизмами рифтогенеза (Mats, 2012; Мац, 2015):

1. *Пассивный (поздний мел - эоцен)*: отклик на глобальное растяжение территорий Азии (King, 1967; Николаев, 1984);
2. *Импактогенный (поздний олигоцен - ранний плиоцен)*: движущей силой послужил фронт Индо-Евразийской коллизии (Molnar, 1975).
3. *Активный (плиоцен - антропоген)*: главным геодинамическим фактором является астеносферный выступ под зоной Байкальского рифта (Gao, 1994, 2003; Zorin, 2003; Зорин, 2005; Tiberi, 2008).

1.3.1. Геологическое строение Прибайкалья

Расположение Байкальской котловины приурочено к зоне краевого шва древней платформы. Западное побережье Байкала слагают преимущественно архей-протерозойские комплексы пород фундамента и осадочного выполнения Сибирской платформы. Восточный борт выполнен в основном позднепротерозойскими-палеозойскими породами Саяно-Байкальского складчатого пояса (рис. 4). Данный складчатый пояс представляет собой мозаику террейнов, сложенных породами микроконтинентов, островных дуг и задуговых прогибов, существовавших в конце протерозоя – палеозое в пределах Палеоазиатского океана. Присоединение этих террейнов к Сибирской платформе происходило постепенно в ходе каледонской и герцинской эпох складчатости (Зоненшайн, 1990; Беркин, 2009; Байкал. Геология..., 2011).

Породы Сибирской платформы

Архей. Древнейшие архейские комплексы пород (2560 ± 40 млн лет) обнажены в пределах Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы по юго-западному побережью Байкала (на участке между поселком Култук и истоком реки Ангары). Комплекс сложен пироксеновыми, амфибол-пироксеновыми кристаллическими сланцами и двупироксеновыми, амфибол-биотитовыми, гранат-пироксен-биотитовыми, гранат-силлиманит-биотитовыми гнейсами с прослоями амфиболитов и железистых кварцитов. Для образований Шарыжалгайской серии характерны интенсивные процессы мигматизации и гранитизации. Общая мощность пород не менее 5000 - 6000 м (Эволюция Земли ..., 2008; Беркин, 2009; Байкал. Геология..., 2011).

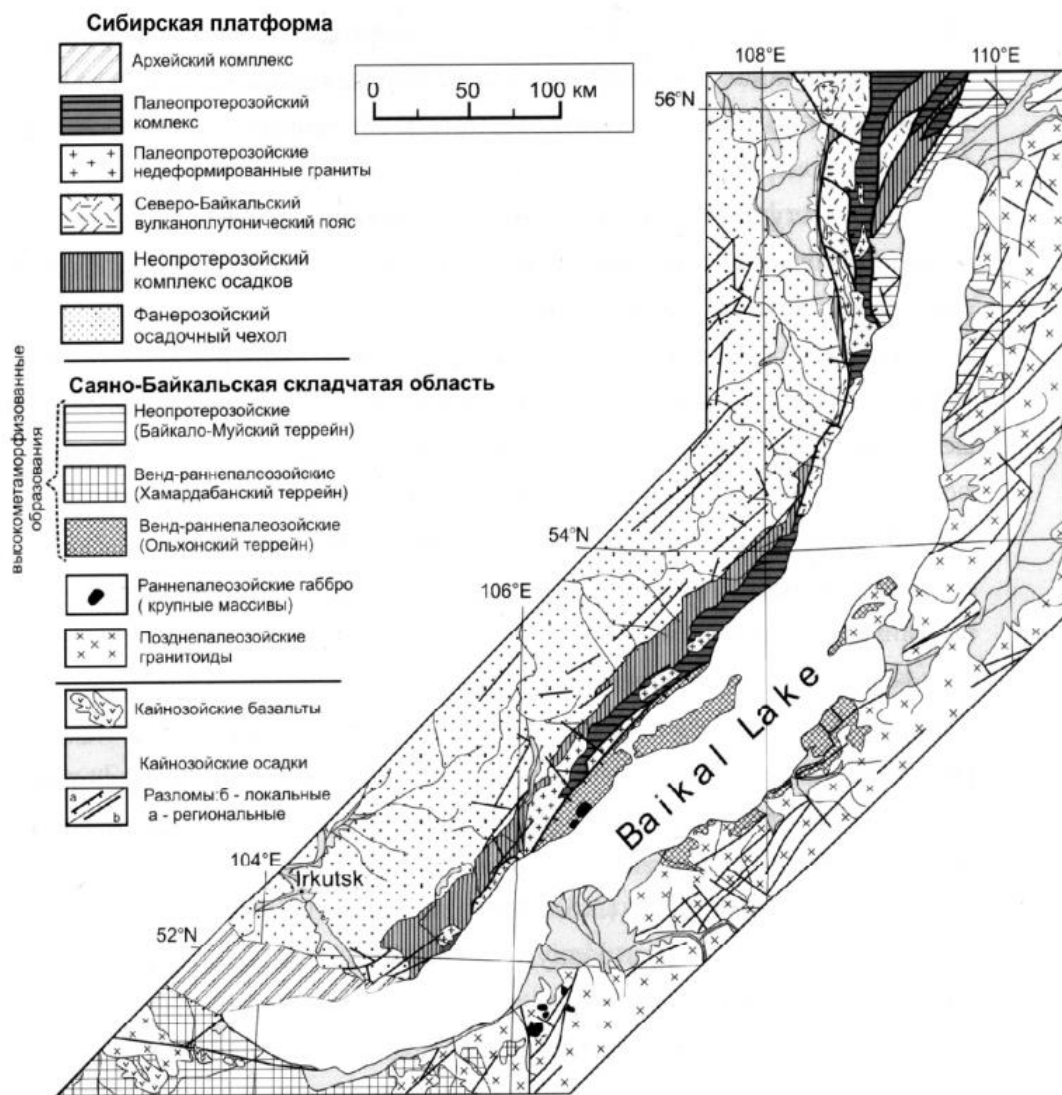


Рисунок 4 Карта – схема геологического строения Прибайкалья
(Эволюция Земли..., 2008)

Протерозой. Комплексы пород протерозойского возраста, слагающие фундамент платформы, прослеживаются в районе Приморского и Байкальского хребтов. Породы в пределах Приморского хребта относятся к иликтинской свите PR₁il сарминской серии. Для данной свиты характерны осадочно-вулканогенный состав (метаморфизованные алевролиты и песчаники с прослоями туфов и карбонатных пород), фациальная изменчивость разреза, интенсивная складчатость и зональный метаморфизм от зеленосланцевой до амфиболитовой фации. Отложения данной свиты прорваны гранитами приморского комплекса, габбро-долеритами и плагиогранитами кочериковского комплекса. Общая мощность свиты варьирует от 3100 до 4200 м. Выходы пород иликтинской свиты распространены фрагментарно в осевой части хребта (Булдыгеров, 2005; Беркин, 2009).

Байкальский хребет сложен преимущественно вулканогенно-осадочными комплексами пород акитканской серии мощностью до 4,5 км. В данную серию входят малокошинская (PR_{1mk}) и хибеленская (PR_{1hb}) свиты, которые прослеживаются вдоль всего западного побережья. Малокошинская свита состоит из песчаников, гравелитов, конгломератов и сланцев с чередованием вулканогенных толщ. Хибеленская свита сложена дацитовыми, трахириолитовыми порфирами с горизонтами туфов, изредка встречаются маломощные покровы андезитов и базальтов (Байкал. Атлас..., 1993; Булдыгеров, 2005; Байкал. Геология..., 2011).

Рифей. К позднерифейским толщам осадочного чехла платформы относят комплексы пород голоуспенской, улунтуйской, качергатской свит, входящих в байкальскую серию. Голоуспенская свита (R_{2gl}) представлена терригенно-карбонатными породами, слагающими узкую полосу шириной около 6 км вдоль северо-западного побережья Байкала. Состав свиты: кварцевые песчаники, конгломераты, глинистые сланцы, доломиты и известняки. В разрезе улунтуйской свиты (R_{2-3ul}) преобладают алевролиты, глинистые сланцы и известняки. Отложения свиты не выдержаны по простиранию и фациально очень изменчивы. Качергатская свита (R_{3kc}) включает в себя алевролиты, кварцевые песчаники, глинистые сланцы, прослой глинистых известняков и конгломератов. Мощность всего комплекса достигает 3500 м (Северо-Байкальский..., 2003).

Венд. Продолжают разрез осадочного чехла платформы ушаковская, куртунская и аянканская свиты венда. Ушаковская свита (V_{1uш}) обнажается в верховьях Лены. Свита сложена песчаниками с маломощными прослоями конгломератов, гравелитов и глинистых сланцев. Куртунская свита (V_{1kr}) представлена песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами. Аянканская свита (V_{2an}) состоит из доломитов, известняков, известковистых песчаников, реже аргиллитов (Булдыгеров, 2005; Байкал. Геология..., 2011).

Юра. Нижне-среднеюрские отложения, несогласно залегающие на образованиях неопротерозоя и раннего палеозоя, встречаются в районе истока реки Ангары. Они представлены терригенными породами: конгломератами, песчаниками, алевролитами и глинами с прослоями сланцев и углей. Максимальная мощность данных отложений достигает 600 м (Беркин, 2009; Байкал. Геология..., 2011).

Породы Саяно-Байкальской складчатой области

Протерозой. Неопротерозойские породы нюрундуканской толщи протягиваются узкой полосой от западного побережья озера Байкал (район мыса Котельникова) в северо-восточном направлении. В ее составе выделяются амфиболиты

и метабазальты, амфиболовые и кварц-эпидот-биотитовые плагиогнейсы и кристаллические сланцы. Для толщи характерно широкое развитие мигматитов, гнейсогранитов, кварцитов и присутствие линз мраморов. Состав и строение нюрндуканской толщи существенно меняется не только вкрест, но и по простиранию, что определяется ее сложным покровно-складчатым строением. Данные породы являются частью Байкало-Муйского террейна, присоединившегося к Сибирской платформе в конце протерозоя (Беркин, 2009; Байкал. Геология..., 2011).

Венд – ордовик. Ольхонский террейн, охвативший остров Ольхон и Приольхонье, включает в себя три тектонические пластины, которые сложены преимущественно кристаллическими сланцами, гнейсами, мраморами и амфиболитами. Тот же возраст имеет Хамардабанский террейн, расположенный на восточном борту южной части Байкальской котловины в районе хребта Хамар-Дабан. В составе террейна объединены породы слюдянской, хангарульской и хамардабанской серий. Слюдянская серия представлена ритмично переслаивающимися мраморами, биотитовыми, гранат-биотитовыми гнейсами и кристаллическими сланцами. Хангарульская серия включает в себя сланцы, диопсидовые и кальцит-диопсидовые гнейсы с прослоями мраморов. В составе хамардабанской серии основной объем пород приходится на биотитовые, биотит-гранатовые, биотит-гранатово-силлиманитовые гнейсы, а также сланцы с биотитом и гранатом. Возраст серий остается условным, так как геохронологические определения неоднозначны (Слюдянский..., 1981; Байкал. Атлас..., 1993; Беркин, 2009).

По всему восточному побережью Байкала (к северу от устья Селенги и вплоть до самой северной точки озера) широко распространены позднепалеозойские гранитоиды Ангаро-Витимского батолита (Байкал. Геология..., 2011).

Синрифтовые мезозой-кайнозойские породы

К синрифтовым отложениям Байкальского региона относятся верхнемеловые-кайнозойские породы, период накопления которых соответствует времени развития рифтогенеза и формирования котловины озера Байкал. Для данных отложений была предложена детальная литолого-стратиграфическая схема (табл. 1) (Мац, 2012).

Согласно данной схеме с конца мела (маастрихт) до конца палеогена в Прибайкалье преобладали процессы пенеппенизации и образование каолинитовых кор выветривания. Их формирование осуществлялось в условиях теплого гумидного климата при небольших, довольно слабых вертикальных тектонических движениях. Породы данного возраста распространены в районе Приморского хребта, острова Ольхон и Приольхонья.

Схема стратиграфии верхнемеловых-кайнозойских отложений Байкальского региона (Мац, 2012)

Таблица 1

Общие стратиграфические подразделения, млн лет (границы, по [Geologic time..., 2004])			Корреляция местных стратиграфических подразделений		
			Южный и Средний Байкал	Северный Байкал (Приольхонье и др.)	
Четвертичная система	Неоплейстоцен	0.7	Озерные, озеро-аллювиальные и аллювиально-пролювиальные песчано-галечные отложения реликтов предгорной равнины и террас Байкала	Песчано-галечные отложения байкальских террас Нюрганская свита: озерные и пролювиальные пески, песчано-грубообломочные отложения, костные остатки мелких и крупных млекопитающих, раковины моллюсков, палинокомплексы, диатомеи; инверсия Брюнес-Матуяма в нижней части разреза, 20 м Заглийские пески, суглинки; остатки мелких млекопитающих, верхнего эоплейстоцена 5 м Почвенно-лессовая толща; остатки мелких млекопитающих нижнего эоплейстоцена 4–6 м	
	Эоплейстоцен	1.8			
Неогеновая	Плиоцен	верхний	Шанхаихинская свита: аллювиально-озерные галечники, пески; остатки мелких млекопитающих позднего плиоцена, палинокомплексы, диатомеи, в том числе <i>Aulacoseira baikalensis</i> 100м Кора выветривания	Харанцинская свита: субазральные красновато-бурые и темно-бурые глины, син-седиментные почвы, в верхней части криогенез, пролювиальные пески, щебнистые отложения; остатки млекопитающих позднего плиоцена, моллюсков; нижняя половина зоны Матуяма, внизу инверсия Гаусс-Матуяма, вверху эпизод Олдувэй, 12-15м Красноцветные кора выветривания и палеопочвы	
		нижний			3.6
	Миоцен	верхний	5.3	Танхойская свита: озерные, озеро-болотные глины, алевролиты, песчаники, угли. В верхней части турбидиты, палинокомплексы. Раковины моллюсков, в том числе <i>Baicaliidae</i> , костные остатки рыб, отпечатки листьев Осиновская свита: аллювиально-пролювиально-дельтаво-озерные песчано-галечные отложения, конгломераты, алевролиты с диатомеями, палинокомплексы	Сасинская свита: озерные глины, алевролиты, пески, субазральные красноцветные пески, суглинки, почвы; остатки млекопитающих позднего миоцена и раннего плиоцена, моллюсков, остракод, диатомовые, в основании базальный горизонт щебнисто валунно-песчаных озерных отложений до 120 м Тагайская свита: гипсоносные озерные и озеро-болотные монтмориллонитовые известковистые глины, пески, бурые угли также загипсованные; многочисленные остатки млекопитающих раннего и среднего миоцена, водоплавающие птицы, земноводные, рыбы, моллюски, диатомовые, спорово-пыльцевые комплексы, до 20 м
		средний	11.6		
		нижний	16.0		
		нижний	23.0		
Олигоцен	верхний	28.4	1200 м	Монтмориллонитовая кора выветривания	
	нижний	33.9	1000 м		
Палеогеновая	Эоцен	55.8	Кварц-кварцитовые озерные галечники в бухтах Песчаная, Бабушка, Сенная, дотанхойские алевролиты с миоспорами палеоцен-эоцена, делювиальные красноцветные каолиновые глины на водораздельных пространствах Приморского хребта, кварцевый аллювий древних долин, Fe/Mn руды, латерит-бокситы, остаточные метасоматические фосфориты, каолиновые брекчии и глины малых озер до 10–15 м	Делювиальные, пролювиальные, озерные (крупного озера) красноцветные аргилизированные глины гетит-гидрослюдистые, каолиновые, фосфориты, алиты; остатки мелких млекопитающих раннего олигоцена до 25 м	
		Палеоцен			61.7
	Даний	65.5			
	Маастрихт	70.6			
Меловая					

Верхнемеловые-палеогеновые отложения озерного, аллювиального и делювиально-пролювиального генезиса встречаются в пределах дельты Селенги, Тья-Горемыкского плато и острова Ольхон (Логачев, 1974; Замараев, 1976; Mats, 2012; Мац, 2012, 2015).

В период с позднего олигоцена - раннего неогена осуществлялось формирование красноцветных кор выветривания и палеопочв, широко представленных на острове Ольхон и Приольхонье. Отложения данного возраста подразделяются на два типа разрезов: Южнобайкальский и Северобайкальский, имеющих существенные различия в строении и мощности.

Породы, относящиеся к Южнобайкальскому типу разреза (верхний олигоцен - эоплейстоцен), широко представлены вдоль северного подножия хребта Хамар-Дабан, залегая в основании разреза прилегающей предгорной аккумулятивной равнины. По характеру отложений был сделан вывод о том, что их накопление осуществлялось в мелководных условиях вблизи крупного озера. Осадки представлены преимущественно терригенными угленосными породами озерного, озерно-болотного генезиса и грубообломочными песчано-галечными отложениями танхойской (верхний олигоцен – нижний плиоцен), осиновской (верхний олигоцен – нижний плиоцен) и шанхаихинской (верхний плиоцен - эоплейстоцен) свит. Их мощность до 1000 - 1500 м.

Северобайкальский тип разреза характеризуется существенно более поздним началом накопления осадков (нижний миоцен) и значительно меньшей мощностью осадочной толщи. Разрез представлен озерными и озерно-болотными отложениями тагайской (нижний – средний миоцен), сасинской (верхний миоцен – нижний плиоцен) и харанцинской (верхний плиоцен) свит (Беркин, 2009; Mats, 2012; Мац, 2012, 2015).

Отложения верхнеплиоценового-неоплейстоценового возраста демонстрируют переход от теплого аридного климата к умеренно холодному. Комплекс пород в Южном и Среднем Байкале представлен озерными, озерно-аллювиальными и аллювиально-пролювиальными песчано-галечными отложениями. Северобайкальский разрез состоит из песчано-лессовых толщ, озерных и пролювиальных песчано-грубообломочных отложений нюрганской свиты и песчано-галечных террасовых отложений. В голоцене осуществлялось накопление отложений пойменных рек, глыбовых россыпей, нагорных террас и формирование мощных коллювиальных отложений у подножий хребтов. Отмечено интенсивное проявление эоловых процессов (Беркин, 2009; Мац, 2012, 2015).

1.3.2. Геологическое строение Байкальской котловины

Представление о геологическом строении Байкальской впадины сложилось по результатам глубоководного бурения, геофизическим данным (в большей мере сейсморазведке) и детальному литолого-стратиграфическому анализу синрифтовых комплексов на окружающей озеро суше.

В рамках международного проекта «Байкал-бурение» 1989 - 1999 гг., направленного на изучение палеоклимата и создание палеореконструкций экологической обстановки в центральной части Азии, на озере было пробурено пять глубоководных скважин (рис. 5). Бурение осуществлялось в разных морфоструктурах Байкала: район влияния речного потока Селенги (Бугульдейская перемычка), подводный Академический хребет и дно глубоководной Южной котловины.

Самой глубокой скважиной (BDP-98) были вскрыты осадки с глубины более 600 м, что позволило охарактеризовать палеоклимат почти 10 миллионного отрезка времени. Также проведенные работы дали возможность выяснить условия осадконакопления на разных участках акватории Байкала на протяжении предшествующих сотен тысяч лет. Кроме того, по результатам бурения удалось доказать, что физико-химические условия на дне Байкала способствуют формированию газовых гидратов, которые впервые были подняты из пресноводного бассейна в осадках скважины BDP-97 с глубин 121 и 161 м (Коллектив...,2000; Кузьмин, 2000, 2001).

Во всех котловинах Байкала разрез донных отложений, полученный в результате бурения, характеризуется довольно четкой ритмичностью, связанной с чередованием прослоев терригенных глинистых осадков и диатомовых илов. Постоянство разреза (однородность состава, структуры и текстуры осадочных отложений) свидетельствует о том, что условия осадконакопления были практически неизменными вплоть до настоящего времени. Ритмичная структура, характерная для всех осадков акватории озера Байкал, обусловлена климатическими колебаниями в период их накопления.

Некоторые особенности имеют разрезы донных отложений, полученные в результате бурения на Бугульдейской перемычке и на дне центральной части Южной котловины озера. В данных разрезах, наряду с глубоководными озерными осадками, широко представлены турбидитовые прослои, сложенные гравийно-песчаным материалом (Коллектив...,2000; Kuzmin, 2000; Кузьмин, 2001).

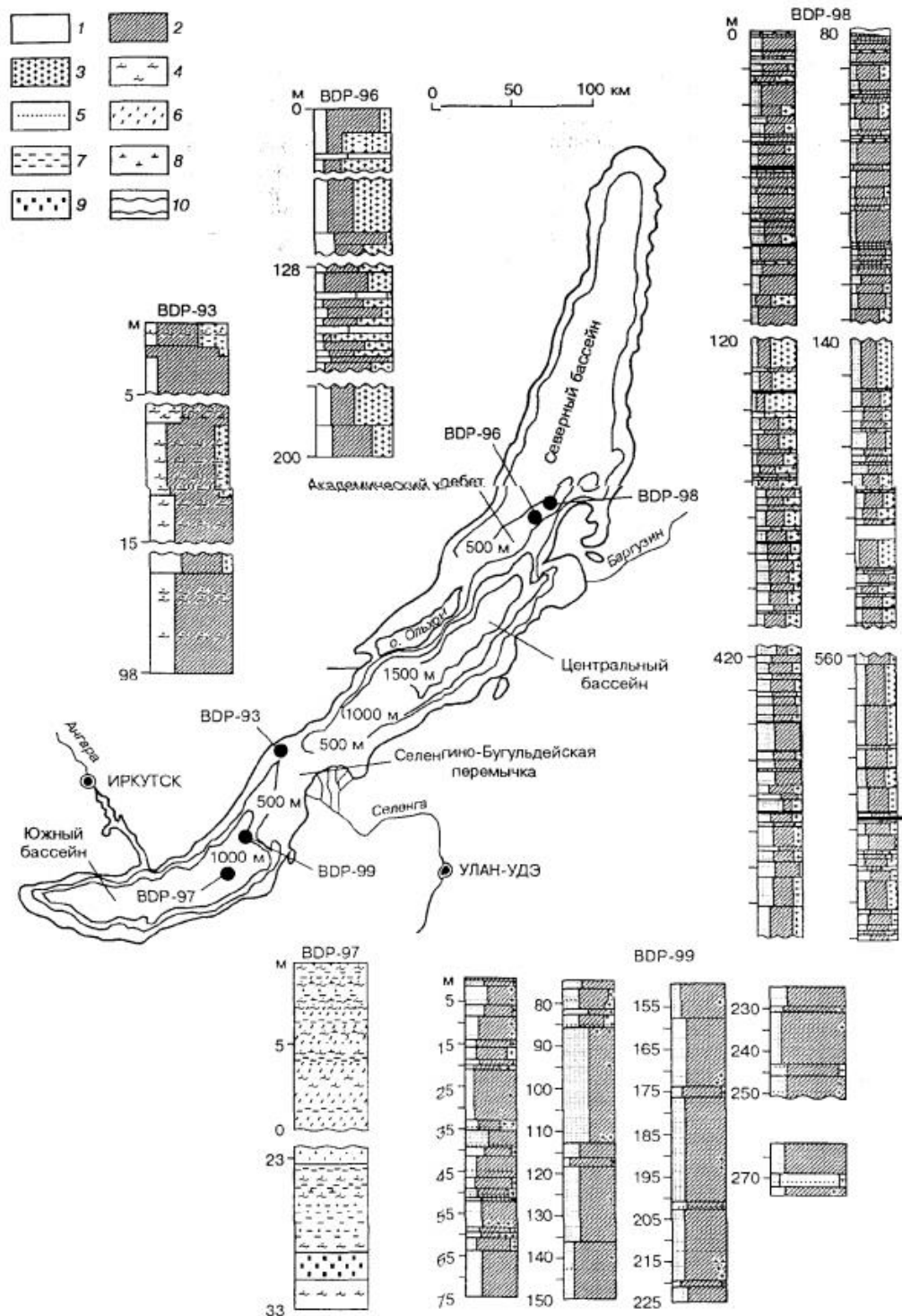


Рисунок 5 Схематичная батиметрическая карта оз. Байкал.

Кружками показаны места бурения скважин (Кузьмин, 2001).

- 1 – мелкий песок или алеврит; 2 – материал глинистой размерности; 3- остатки диатомовых водорослей; отдельные крестики на фоне косой штриховки – единичные остатки диатомей; 4 – нижняя граница турбидитных прослоев; 5 – грубозернистый материал турбидитных прослоев; 6 – пелитовый ил с редкими диатомеями глубоководных котловин; 7 – глинистые прослои в глубоководных котловинах; 8 – остатки растительности; 9 – шлам; 10 – пропуск в разрезе

Так как Байкальский рифт имеет сложную многоэтапную историю развития, возраст и условия формирования его Южной, Центральной и Северной котловины различны, что довольно четко фиксируется на сейсмических разрезах. На рисунке 6 представлена модель строения озера Байкал, выполненная по результатам интерпретации сейсмического разреза МОВ, проходящего через Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины (Hutchinson, 1992; Мац, 2012; 2015). Согласно данным работам мощность осадочного выполнения Байкала составляет 7-8 км.

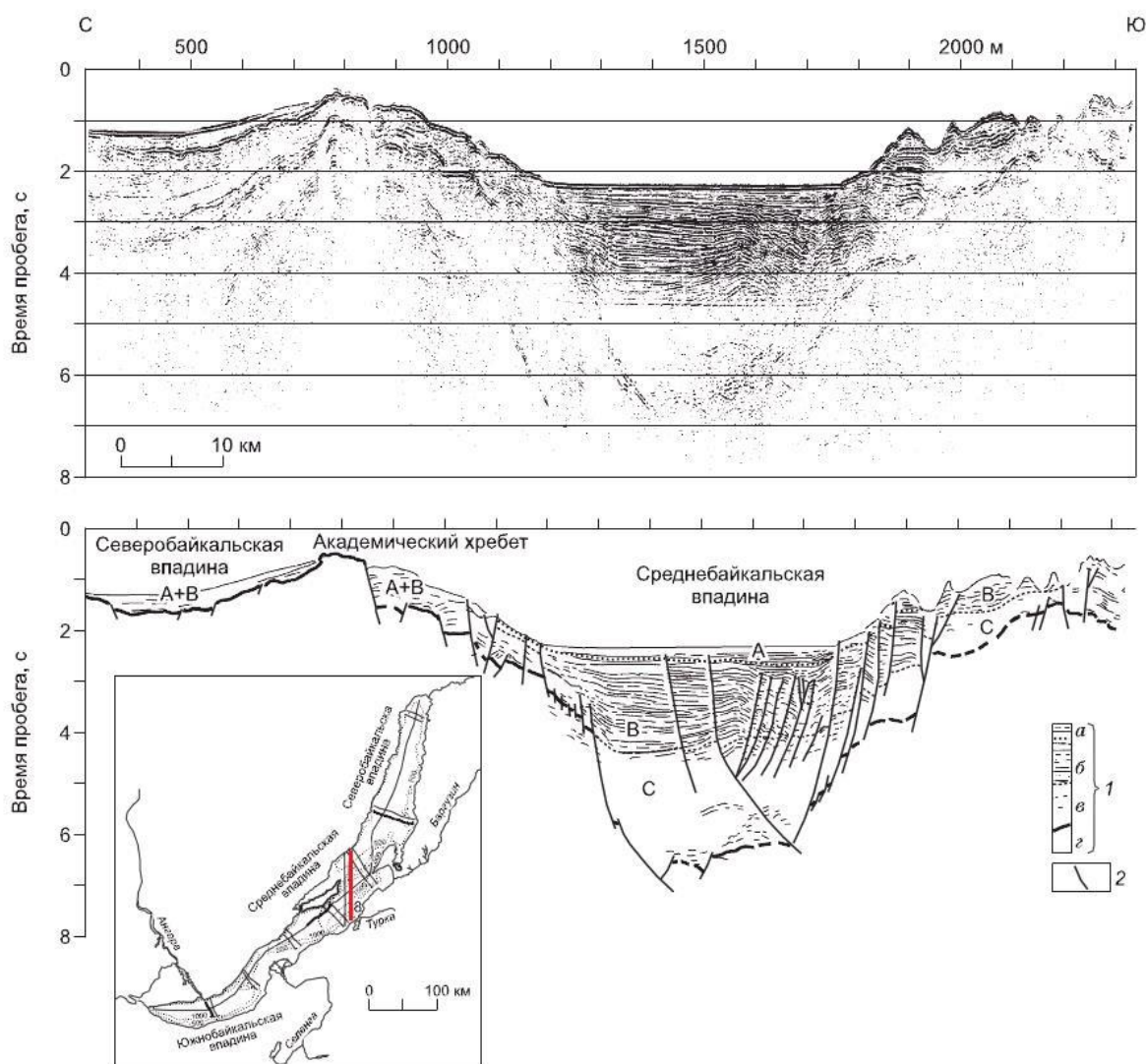


Рисунок 6 Сейсмический разрез МОВ-ОГТ по профилю 8, проходящий через подводный Академический хребет и примыкающие к нему Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины (Hutchinson, 1992) с изменениями (Мац, 2012).

А - слоистый недеформированный комплекс ССК-3 (квартер); В - слоистый деформированный комплекс ССК-2 (верхний олигоцен - плиоцен); С - сейсмически прозрачный комплекс ССК-1 (верхний мел - нижний олигоцен); 1 - этапы развития рифта: а - современный, б - средний, в - проторифт, г - дорифтовый фундамент; 2 - предполагаемые разломы. На врезке - положение профиля на озере Байкал

Довольно близкие подсчеты мощности (до 9,5 км) в Среднебайкальской котловине представлены по результатам интерпретации материалов МПВ (рис. 7) (Brink, 2002). Представление о строении Южнобайкальской котловины было получено из результатов сейсмических работ методом МПВ вдоль профиля Солзан-Посольское (рис. 8).

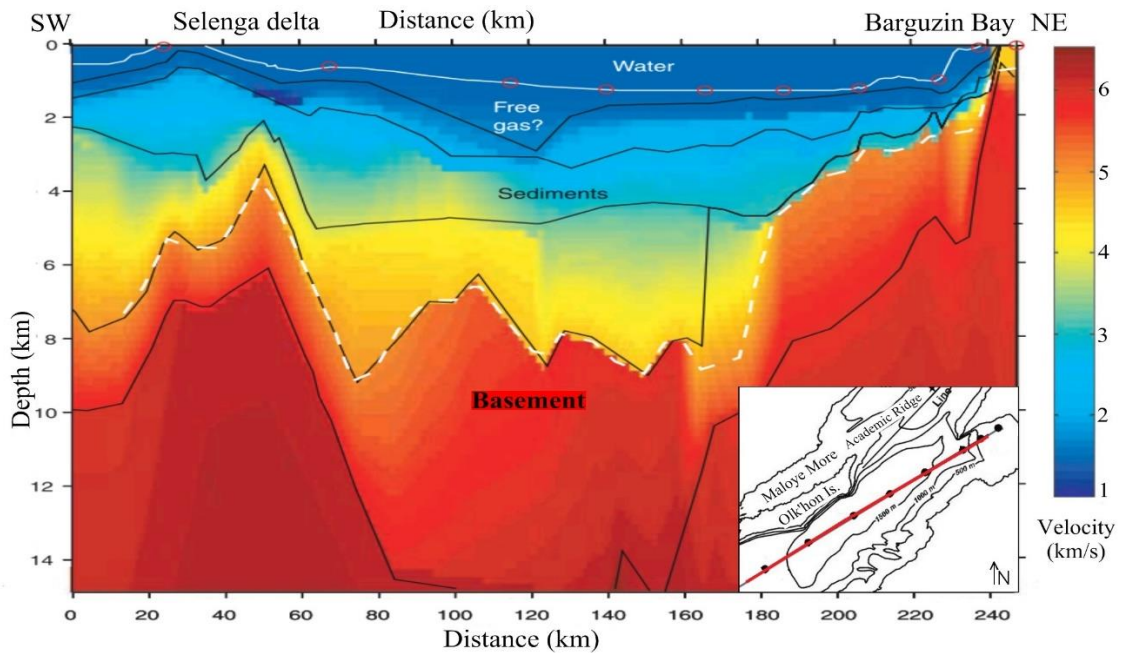


Рисунок 7 Скоростная модель по данным МПВ вдоль Центральной Байкальской котловины. Белая пунктирная линия - граница фундамента (Brink, 2002)

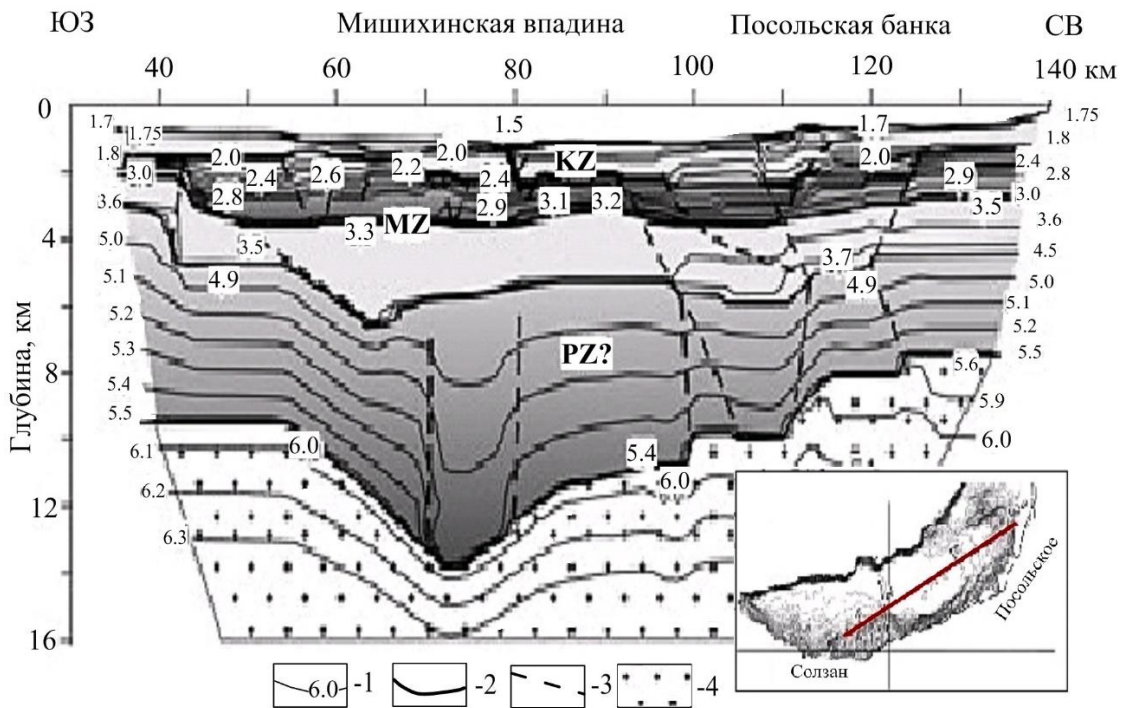


Рисунок 8 Сейсмический разрез по результатам численного моделирования.

1 - изолинии скорости (км/с), 2 - сейсмические границы, 3 - предполагаемые разломы, 4 - фундамент (Суворов, 2005)

Согласно данной интерпретации, положение сейсмического горизонта, соответствующего фундаменту, находится значительно глубже, чем в Центральной и Северной котловинах, достигая глубины 14 км (Суворов, 2005). Такая мощная толща осадочных отложений под Южной котловиной озера объясняется автором наличием в ней, помимо пород кайнозойского и мезозойского возрастов, более древних, предположительно, палеозойских отложений. Существует несколько теорий возникновения на данной территории палеозойских отложений (Беличенко, 1994; Парфенов, 1996; Суворов, 2005):

- длительное осадконакопление в последовательно развивавшемся бассейне;
- быстрое прогибание и захоронение уже существовавших отложений;
- захоронение палеозойских отложений в результате коллизионных процессов.

Осадочная толща краевых зон Байкальского рифта исследована общегеологическими методами по обнажениям на Прибайкалье, в разрезах которых выделены три тектонолитостратиграфических комплекса (ТЛСК) (табл. 1) (Мац, 2012; 2015):

ТЛСК-1 слагают преимущественно мел-эоценовые мономиктовые отложения различной фациальной и генетической природы и латерит-каолининовая кора выветривания (Домбровская, 1984; Логачев, 2002).

ТЛСК-2 представлен олигоцен-нижнеплиоценовыми терригенно-глинистыми отложениями нижней молассы. В составе данного комплекса преобладают песчано-глинисто-алевритовые отложения прибрежно-озерного, озерного и дельтового генезиса (танхойская свита). Присутствуют и грубообломочные отложения конусов выноса (осиновская свита), отложения, характерные для малоглубинных озер (тагайская свита) и крупных достаточно глубоких озер (сасинская свита).

ТЛСК-3 включает в себя верхнеплиоцен-четвертичные полимиктовые отложения, отнесенные к осадкам верхней молассы. Состав комплекса характеризуется отложениями прибрежной зоны крупного глубоководного озера, сменяющиеся во внутренней части глубоководными глинисто-алевритовыми осадками (Адаменко, 1984; Кузьмин, 2001; Мац, 2012; 2015).

Данным тектонолитостратиграфическим комплексам Прибайкалья соответствуют три сейсмостратиграфических комплекса (ССК) в разрезе донных отложений (рис. 6, табл. 2) (Хатчинсон, 1993; Зоненшайн, 1995; Moor, 1997; Mats, 2012; 2013; 2015):

Система	Отдел/подотдел/ярус	Возраст нижней границы, млн лет [Geologic time..., 2008]	Региональный корреляционный горизонт [Mats, 2013]	Тектонолитостратиграфический комплекс	Сеймостратиграфический комплекс [Hutchinson et al., 1993]	Тектоническая фаза	Возраст, млн лет	Сейсмическая граница				
Квартер	Голоцен		0.01	Нюрганский	ТЛСК-3	Тыйская	0.15–0.12	A2, U1				
	Плейстоцен	верхний	0.13						Слоистый недеформированный ССК-3			
		средний	0.7									
		нижний	1.80									
Неоген	Плиоцен	верхний	3.6	Шанхаихинский (аносовский)	ТЛСК-2-2	Ольхонская	3–4	B6, U4				
		нижний	5.3									
	Миоцен	верхний	11.6	Танхойский	ТЛСК-2	Северо-байкальская	10	B2, U5				
		средний	16.1									
		нижний	23.0									
	Палеоген	Олигоцен	верхний	28.4	Тагайский подгоризонт	ТЛСК-2-1	Тункинская	27–25	U6			
нижний			33.9									
Эоцен		55.8		Каменский						ТЛСК-1	Сейсмически прозрачный ССК-1	
		Палеоцен	верхний									61.1
			нижний									65.5
Мел	Маастрихит	70.6			Ранняя рифтовая	70–60	?					
	Фундамент		Фундамент	Фундамент	Фундамент	Фундамент						

- ССК-1 - прозрачный сейсмический комплекс, слагающий наиболее глубоководные части осадочного разреза, залегающие непосредственно на породах фундамента в центральной части хребта. Присутствует только в Южной и Средней котловинах Байкала.
- ССК-2 - слоистый сильно деформированный комплекс, содержащий довольно протяженные отражающие горизонты, разбитые множеством дизъюнктивных нарушений. Распространен по всей акватории озера Байкал.
- ССК-3 - слоистый недеформированный комплекс, залегающий с несогласием на ССК-2. Выявлен во всех трех котловинах Байкала.

Таким образом, к настоящему времени получен достаточно полный объем данных о глубинном строении Байкальской котловины. Однако достоверная информация, которая могла бы дать однозначный ответ о структуре и возрасте глубокозалегающих комплексов пород, отсутствуют, а результаты интерпретации в рамках применяемых геофизических моделей совсем не однозначны.

1.4. Газовые гидраты озера Байкал

Вопросы изучения геологических процессов, связанных с миграцией углеводородов, приобрели в последнее время особую остроту в связи с проблемой газогидратов. Воздействие гидратов на баланс окружающей среды, решение важнейшего экологического вопроса о глобальном потеплении (парниковый эффект), обсуждение многих природных бедствий (подводные оползни и обвалы) привели к необходимости разработки газогидратной тематики. Помимо вопросов о влиянии газовых гидратов на экосистемы, интерес к данной проблеме связан с их присутствием в осадочных разрезах нефтегазоносных бассейнов и с возможностью освоения газогидратных залежей в качестве альтернативного топливного источника. Кроме того, уникальная особенность нахождения газовых гидратов в пресных водах Байкала позволяет изучать термодинамику их образования в сравнении с солеными водами на континентальных склонах и в окраинных морях, что является важным вкладом в понимание процессов образования нефти и газа.

Газовые гидраты представляют собой твердые клатратные соединения, в которых молекулы гидрофобных газов (чаще всего метана) заполняют структурные пустоты кристаллической решетки, сформированной молекулами воды (Бык, 1980; Макогон, 1985; Дядин, 1998). Для их образования и сохранения необходим комплекс определенных факторов: высокое давление, низкая (не обязательно отрицательная)

температура, а также достаточное количество воды и газа (Гинсбург, 1994; Дучков, 2003). Согласно фазовым диаграммам зоны стабильности газогидратов, термобарические условия, существующие в осадках озера Байкал, являются благоприятными для формирования гидратов метана по всей акватории, где глубины достигают 300-400 м, причем верхняя граница зоны стабильности совпадает с поверхностью дна (Дучков, 2003; Бычинский 2008). Положение нижней границы зоны стабильности газогидратов в осадках озера было рассчитано и впервые представлено в виде прогнозной карты мощности газогидратного слоя (рис. 9) в работе (Голубев, 1997). Для Байкала характерна значительная мощность слоя газовых гидратов (в среднем 300 – 350 м), достигая 600 м в наиболее глубокой Центральной котловине озера. Следует отметить, что такой прогноз мощности газогидратного слоя по термобарическим данным позволяет выделить осадочный слой с условиями благоприятными для их образования и сохранения, но не дает точной информации об их наличии или отсутствии. Нижнюю границу действительно существующего газогидратного слоя позволяет определить сейсмический метод, о котором будет сказано в следующих главах.

Как все соединения клатратного типа газовые гидраты очень чувствительны к изменениям условий равновесия. Любые процессы, ведущие даже к небольшому снижению давления или повышению температуры, могут привести к разложению прочно сцементированных гидратосодержащих пород в разжиженную массу и к высвобождению огромного количества свободного газа, объём которого в 160-180 раз превышает объём гидратов (Хавкин, 2008). Инициаторы таких процессов могут быть самые разнообразные: сейсмическая или вулканическая деятельность, повышение температуры за счет продолжающегося процесса седиментации, а также антропогенное воздействие человека.

Для Байкала такие опасности особенно актуальны, так как данная территория является высокосейсмичной и характеризуется довольно частыми и интенсивными землетрясениями (Исаев, 2003). Именно эти самопроизвольные извержения газов, не подверженные прогнозу, но сопряжённые по времени с землетрясениями, являются главной опасностью. Кроме того, вследствие высокой тектонической активности дно озера достаточно быстро опускается и гидратный слой постепенно входит в зону более высоких температур, способствуя разложению гидратов и высвобождению метана. Такие процессы опасны не только для уникальной флоры и фауны озера, но и для людей.

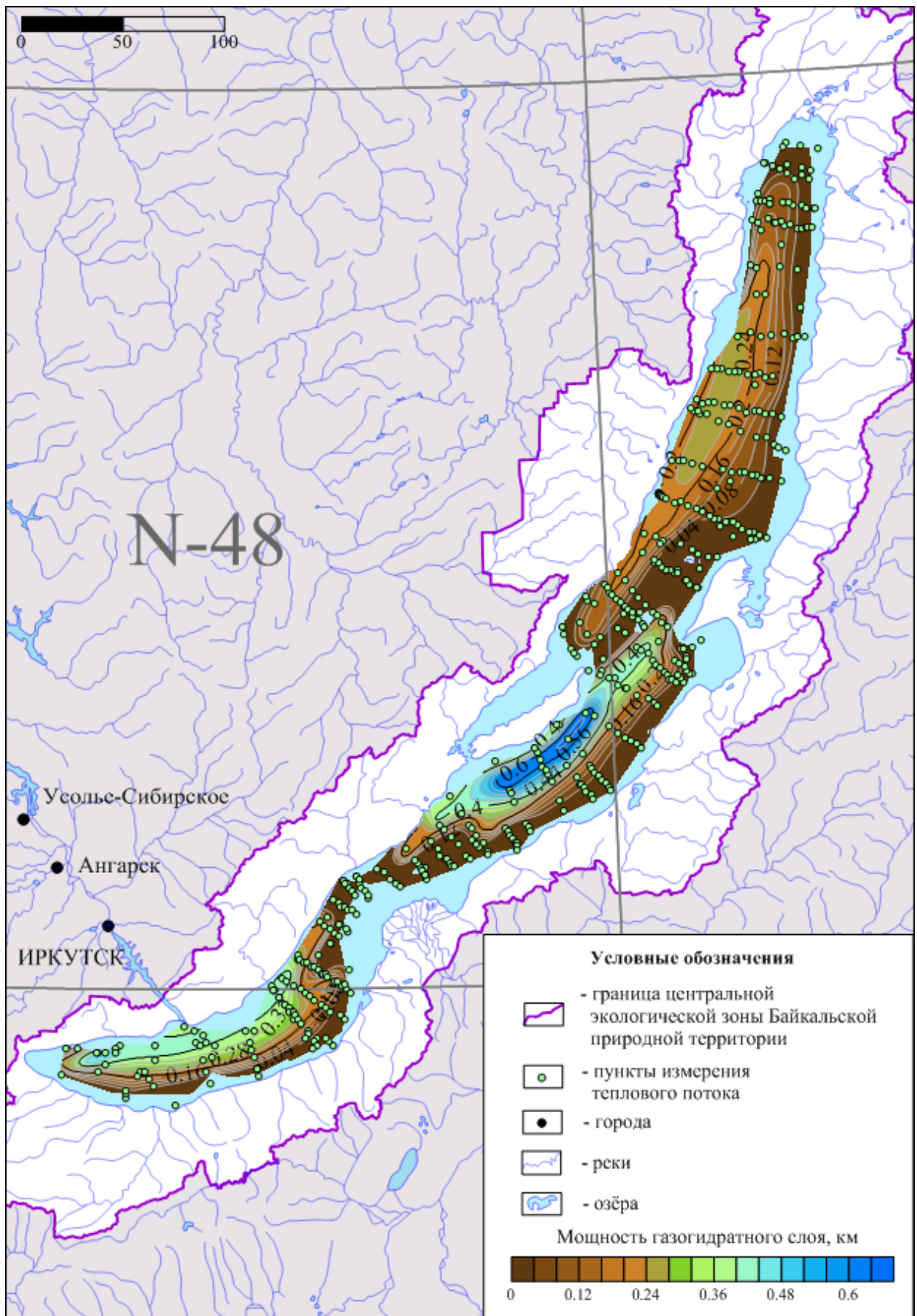


Рисунок 9 Карта прогноза мощности газогидратного слоя (Голубев, 1997)

При более масштабном рассмотрении вопроса экологическую опасность газогидраты представляют потому, что выделяющийся из них метан поглощает тепловое излучение Земли примерно в 20 раз интенсивнее углекислого газа, ответственного за парниковый эффект и потепление климата нашей планеты (Макогон, 1974). Если потепление будет продолжаться, приумноженное еще и техногенным воздействием человека, то рано или поздно наступит момент, когда гигантские скопления газогидратов начнут самопроизвольно дегазироваться вследствие повышения температуры, вызывая тем самым необратимую цепную реакцию. В силу этих обстоятельств необходимо подчеркнуть, что газовые гидраты хоть и надмолекулярные соединения, тем не менее, являются важным компонентом приповерхностных геосфер и могут колоссально влиять на экологическую обстановку.

2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Сейсмические данные имеют решающее значение при изучении геологического строения Байкала. Представленные в настоящей работе современные способы обработки и интерпретации были применены к материалам МОВ-ОГТ и НСП, полученным в 1992 г. на акватории озера Байкал (рис. 10).

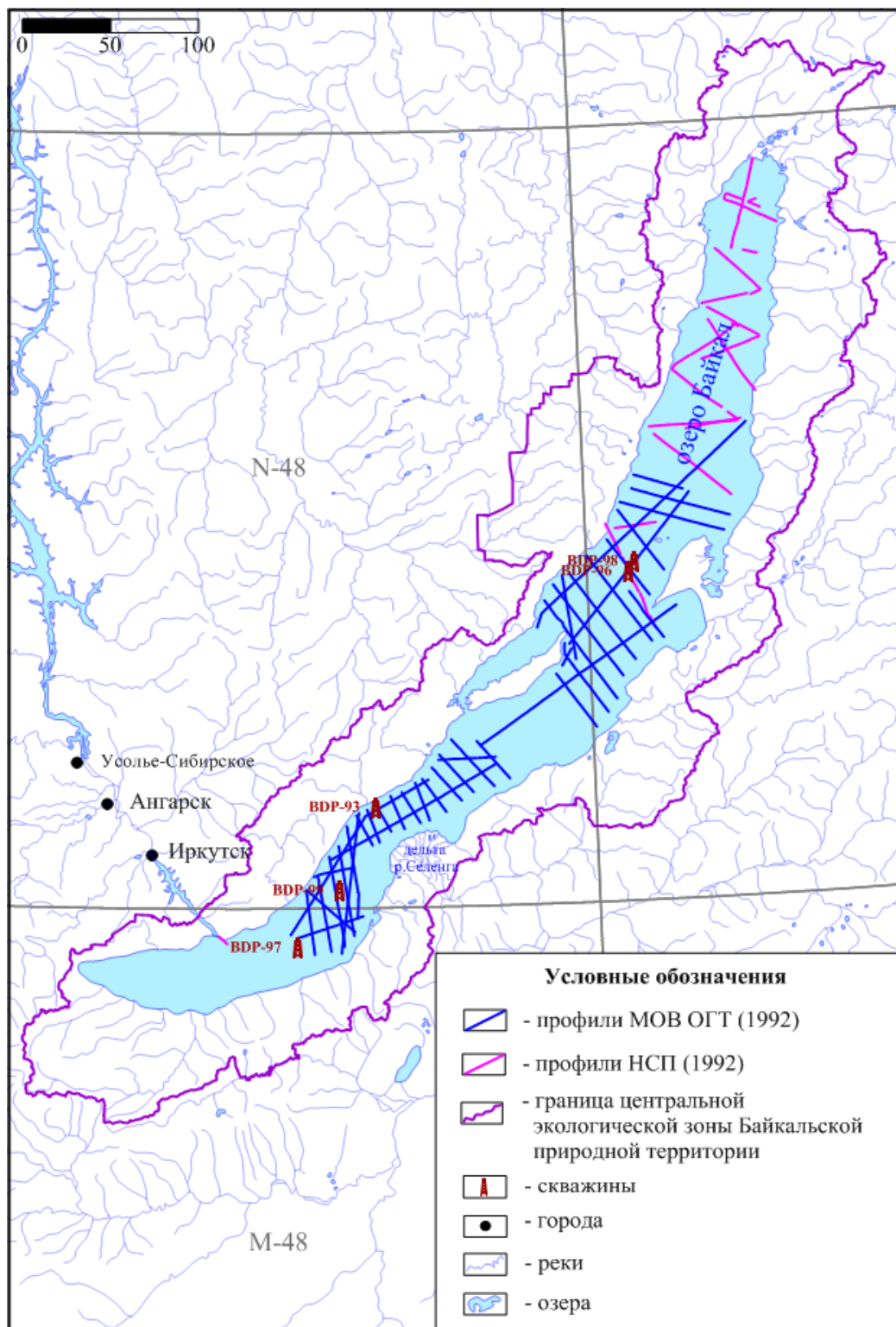


Рисунок 10 Карта-схема озера Байкал с сейсмическими профилями 1992 г.

Многоканальное сейсмическое профилирование

Работы были выполнены в рамках сотрудничества Лимнологического института СО РАН, Института океанологии РАН и Геологической службы США. Исследования проводились с борта научно-исследовательского судна «Балхаш». В качестве источника сейсмических колебаний служила группа из 10 пневмопушек (преобладающая частота - 30 Гц) (Гольмшток, 1995; Lee, 1996). Шаг между пунктами взрыва составил 50 м. Прием сейсмических сигналов осуществлялся 96-канальной приемной косой длиной 2400 м с шагом между приемниками 25 м (рис. 11). Расстояние между центром группы пневмопушек и приемной косой - 500 м. Кратность наблюдений ОГТ – 48. Шаг дискретизации – 4 мс (Nichols, 1992). Работы были сконцентрированы в двух основных районах: Посольская банка, дельта реки Селенги и район Академического хребта. Всего было получено более 2200 км профилей (рис. 10) (Гольмшток, 1995).

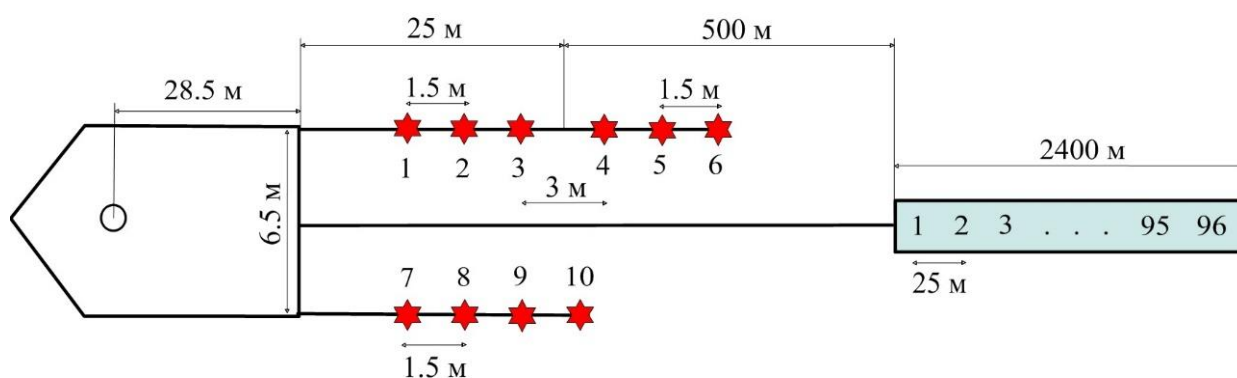


Рисунок 11 Схема проведения работ на судне «Балхаш»
по данным (Nichols, 1992)

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование

Исследования были организованы Объединённым институтом геологии, геофизики и минералогии при участии Института земной коры СО РАН. Работы НСП выполнялись на судне «Байкальский – 4» с применением пневматического источника «Импульс» объемом 3 л (частота сигнала 60 – 150 Гц). Приемная система включала в себя 2 секции наливных кос длиной 25 м с группой из 12 приборов. Количество каналов – 4. Кратность наблюдений – 1. Частота дискретизации – 500 – 2000 Гц. Исследования проводились в северной части акватории Байкала и включали в себя около 600 км профилей (рис. 10).

3. ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

3.1. Граф обработки сейсмических данных

Первоначально сейсмические данные были обработаны Геологической службой США в 1992 году. Последовательность обработки соответствовала стандартному графу (рис. 12) (Agena, 1992):



Рисунок 12 Граф обработки сейсмических данных МОВ, выполненных на озере Байкал в 1992 г. (Agena, 1992)

- *Предварительная обработка*

Ввод исходных данных, демультимплексация цифровых записей, преобразование данных в формат системы обработки, расчет геометрии системы наблюдений, редакция сейсмотрасс с обнулением бракованных участков, сортировка сейсмограмм.

- *Автоматическая регулировка амплитуд (АРУ)*

Сжатие динамического диапазона колебаний и приведение сейсмической трассы к стационарному виду, когда средний уровень ее интенсивности не изменяется во времени (интервал осреднения - 500 мс).

- *Деконволюция*

Увеличение временной разрешенности записи путем сжатия зарегистрированного сейсмического сигнала (обратная фильтрация).

- *Скоростной анализ*

Определение скоростей по сейсмограммам ОСТ путем построения и интерпретации вертикальных спектров скоростей. Анализ выполнялся неравномерно: в районах со сложной геологической структурой шаг составлял 0,625 – 1,25 км, на более простых участках с горизонтальным залеганием слоев – 2,5 км.

- *Суммирование по ОСТ*

Ввод в трассы каждой из сейсмограмм ОСТ кинематических поправок, соответствующих однократным волнам, суммирование трасс каждой из последовательно расположенных по профилю сейсмограмм ОСТ.

Результатом является временной разрез, который определяется по горизонтали – координатами точек ОСТ, по вертикали – временами отражений от границ по нормальным лучам.

Обработка временных разрезов:

- *Автоматическая регулировка амплитуд*

Интервал осреднения - 1000 мс.

- *Предсказывающая деконволюция*

Подавление регулярных волн-помех типа кратных, реверберационных волн и волн-спутников путем создания фильтра, который оценивает сигнал в будущем времени по его значениям в прошлом.

- *Фильтрация*

Выделение полезных волн на фоне волн-помех, направленное на повышение отношения сигнал-шум и на увеличение разрешенности записи.

- *Миграция*

Построение волнового изображения геологической среды с учетом сейсмического сноса, принимая в расчет отклонение нормалей к отражающим границам от вертикали, кривизну отражающих границ и наличие дифракций.

3.2. Переобработка сейсмических данных

Современная дополнительная обработка сейсмических данных выполнялась в системе CubeTechnology (gritsenko1.ucoz.ru) и включала в себя метод «Сеймостратиграфического суммирования» и построение разрезов методом RGB (рис. 13). Данные методы были применены ко всем временным разрезам МОВ-ОГТ (2200 погонных км) и НСП (600 погонных км). Метод «Сеймостратиграфического суммирования» также был выполнен на сейсмограммах МОВ-ОГТ по профилям, проходящим через Северобайкальскую котловину (500 км).

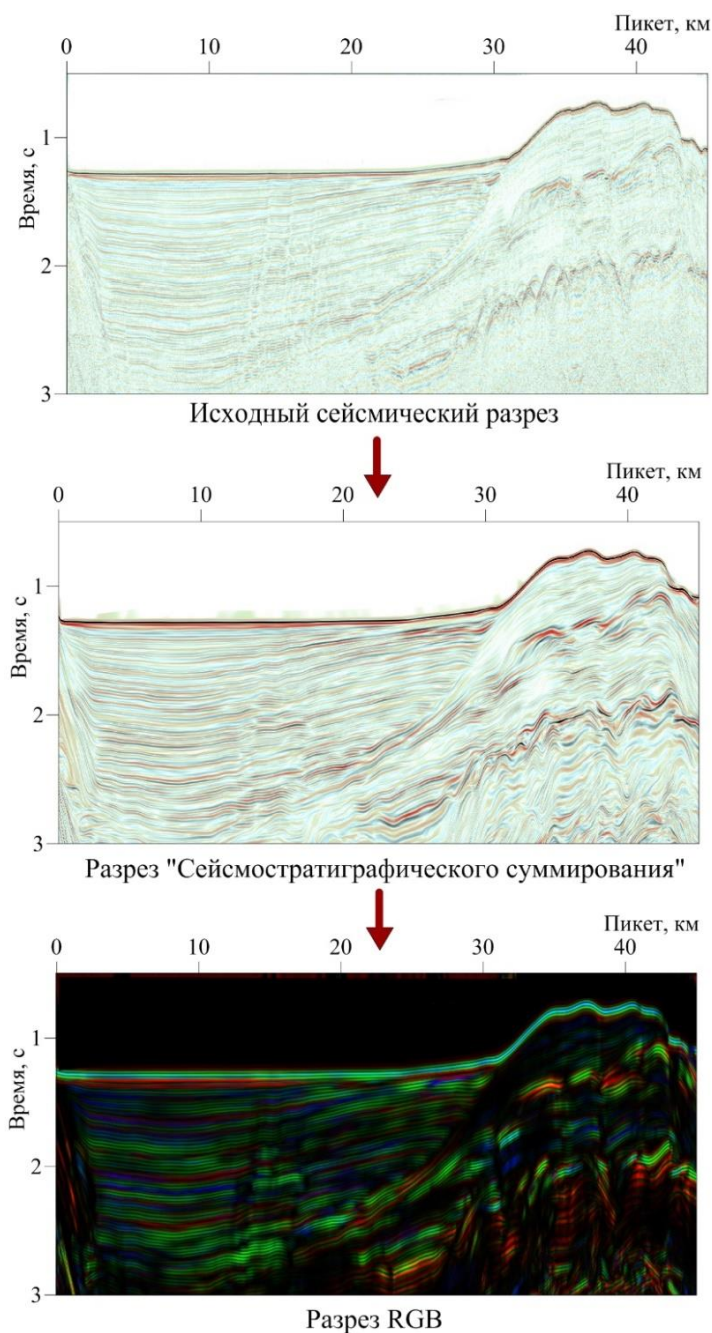


Рисунок 13 Граф переобработки сейсмических разрезов 2017-2018 гг.

3.2.1. Метод «Сеймостратиграфического суммирования»

Метод «Сеймостратиграфического суммирования» представляет собой расширение метода «Сферическое зеркало» (Гриценко, 2014) на любые по протяжённости окрестности суммирования. Метод «Сферического зеркала» основан на расчёте в каждой точке исходного разреза наклонов и кривизны отражающих поверхностей по максимуму оператора когерентности *Seibance* (Taner, 1969). Суммирование амплитуд вдоль данных поверхностей определяют разрез «Сферического зеркала» (рис. 14). Данный метод является аналогом методов мультифокусирования сейсмограмм: *Common-reflection-surface stack* (CRS) (Jäger, 2001), *Multifocusing* (MF) (Gelchinsky, 1999) и *Кинематической фильтрации* (KF) (Гриценко, 2014) для временных разрезов.

Математический алгоритм метода заключается в следующем: задано параметрическое семейство непересекающихся плоских кривых $\tau(x, \theta)$ в плоскости (x, τ) . Параметр θ идентифицирует кривую $\tau(x)$ в параметрическом семействе кривых. Такое параметрическое семейство инициирует двумерную функцию $\theta(x, \tau)$, значениями которой являются значения параметра θ , а изолиниями - кривые $\tau(x)$. Верно и обратное: двумерная функция $\theta(x, \tau)$ определяет параметрическое семейство кривых $\tau(x, \theta)$ как семейство изолиний данной функции.

Если параметрическим семейством кривых $\tau(x, \theta)$ будут времена отражений от сейсмических границ на временном разрезе, то порождаемая им двумерная функция $\theta(x, \tau)$ является «сеймостратиграфическим разрезом» (Гриценко; 2018). Для расчёта значений данного разреза в каждой его точке (x, τ) необходимо найти кривую отражения $\tau(x)$ из параметрического семейства кривых $\tau(x, \theta)$, проходящих через эту точку. Расчёт кривой $\tau(x)$ выполняется с помощью двух итеративных соотношений:

$$\begin{aligned}\tau(x_{i+1}) &= \tau(x_i) + \Delta^+T(x_i, \tau) \\ \tau(x_{i-1}) &= \tau(x_i) + \Delta^-T(x_i, \tau),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Delta^-T(x_i, \tau)$ и $\Delta^+T(x_i, \tau)$ - приращения времени «назад» и «вперед» в каждой точке разреза. Под приращениями времени отражения $\Delta T(x_i, \tau)$ в точке разреза (x_i, τ) понимается изменение времени отражения при переходе «вперёд» от трассы x_i к следующей трассе x_{i+1} или «назад» к трассе x_{i-1} .

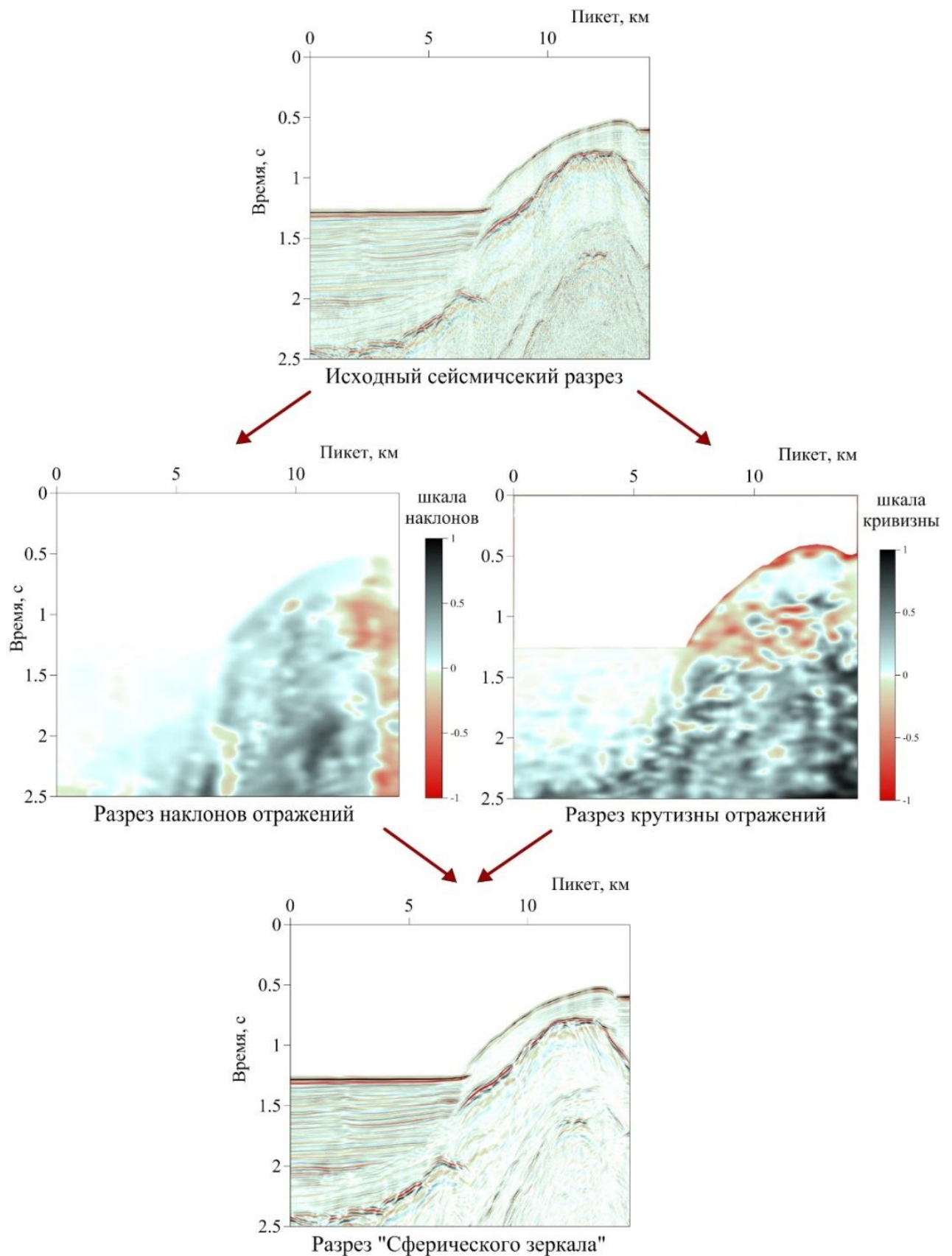


Рисунок 14 Схема построения разреза методом «Сферическое зеркало»

Разрезы приращений времен отражений Δ^-T и Δ^+T рассчитываются по наклонам α и кривизне k отражающих элементов, полученных методом «Сферическое зеркало»:

$$\Delta^+T(x_i, \tau) = \frac{4}{V} \frac{k\Delta^2 - q\Delta\cos(\alpha)}{\sqrt{4k^2\Delta^2 - 4qk\Delta\cos(\alpha) + q^2 + q}} \quad (2)$$

$$\Delta^-T(x_i, \tau) = \frac{4}{V} \frac{k\Delta^2 + q\Delta\cos(\alpha)}{\sqrt{4k^2\Delta^2 + 4qk\Delta\cos(\alpha) + q^2 + q}}$$

где $q = kV\tau + 2$; V – скорость; Δ – расстояние между трассами.

Для построения разреза «Сейсмостратиграфического суммирования» (рис. 15) через точку (x, τ_0) временного разреза $u(x, \tau)$ вдоль рассчитанных по формуле (1) кривых $\tau(x)$ выполняется суммирование по окрестности Δx (Гриценко, 2018):

$$u(x, \tau_0) = \int_{l=-\Delta x}^{l=\Delta x} u(x+l, \tau(x+l, \tau_0)) dl \quad (3)$$

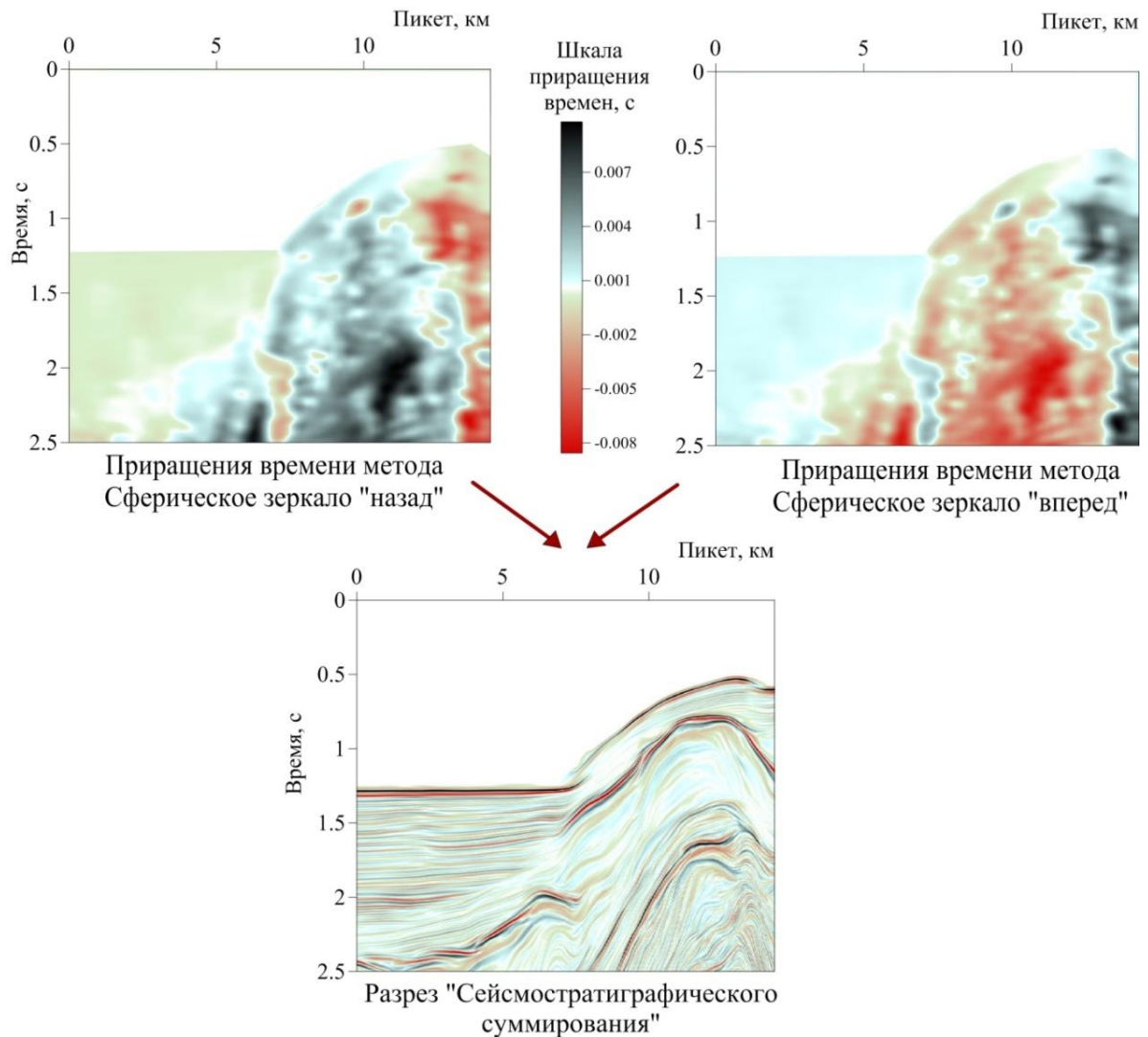


Рисунок 15 Схема построения разреза методом «Сейсмостратиграфическое суммирование»

При сопоставлении исходных сейсмических разрезов с переобработанными по методу «Сеймостратиграфическое суммирование» (рис. 16) отмечено улучшение прослеживания отражающих горизонтов. В частности, на интервале разреза от 2.1 до 2.4 с (0 пикет), где сейсмический полупрозрачный комплекс постепенно поднимается, утыкаясь в дизъюнктивное нарушение на 13 км, и далее по разрезу продолжается с отметки примерно 1.5 с. Внутри данного комплекса слои выделяются более контрастно и отчетливо. Нижележащий сейсмический комплекс на исходном разрезе практически прозрачен, в то время как на переобработанном проявляется некоторая слоистость и довольно интенсивные отражающие горизонты в его центральной части. Однако особого внимания заслуживают зоны разрывных нарушений, где может возникнуть ложное представление о поведении сейсмического горизонта, как, например, на участке разреза 1.7 с на 7-8 км. Здесь одна из сейсмических границ горизонтально-слоистой толщи соединилась с ярким отражением совершенно другого комплекса. Чтобы избежать допущения таких ошибок при прослеживании горизонтов лучше использовать как исходные, так и новые переобработанные разрезы. Кроме того, при интерпретации следует учитывать наличие кратных волн на исходных разрезах, которые вместе с отражениями от полезных волн будут усилены на разрезе «Сеймостратиграфического суммирования».

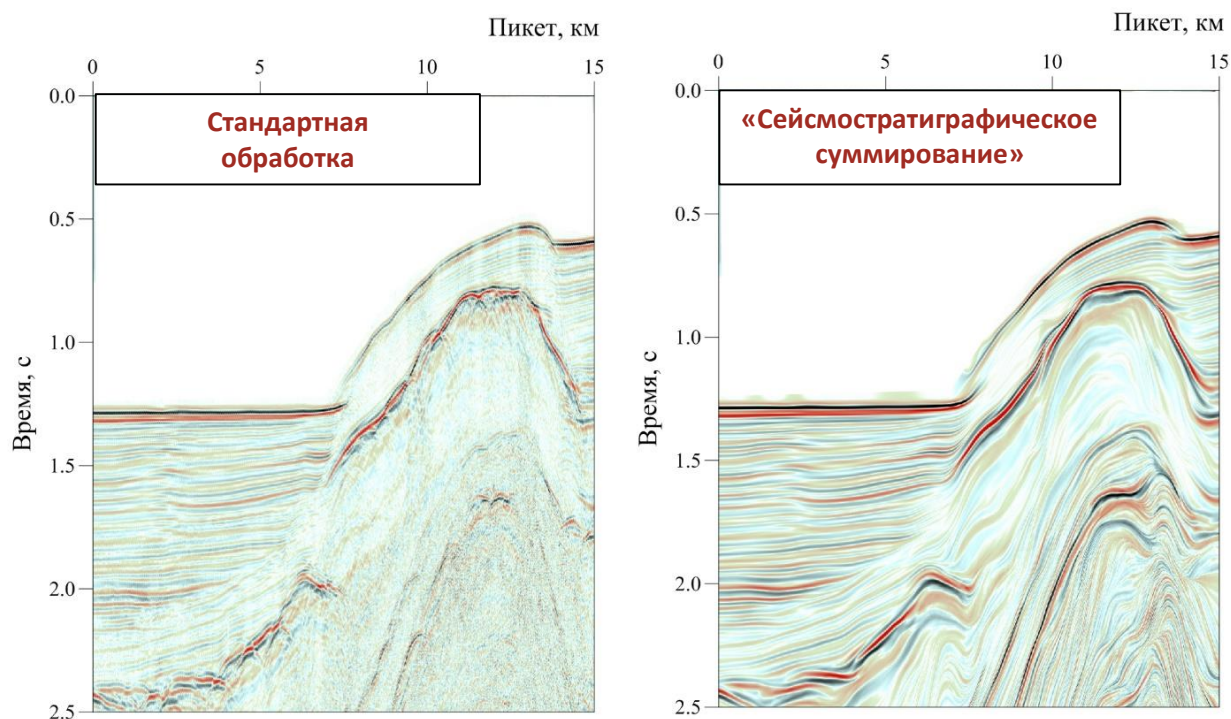


Рисунок 16 Сравнение исходного разреза МОВ по фрагменту профиля 50 с разрезом «Сеймостратиграфического суммирования»

Аналогично «Сеймостратиграфическое суммирование» выполняется и для сейсмограмм, где каждая отдельная сейсмограмма рассматривается как разрез. На полученных таким образом сейсмограммах увеличивается соотношение сигнал-шум и оси синфазности отраженных волн выделяются более отчетливо по сравнению с исходной сейсмограммой (рис. 17).

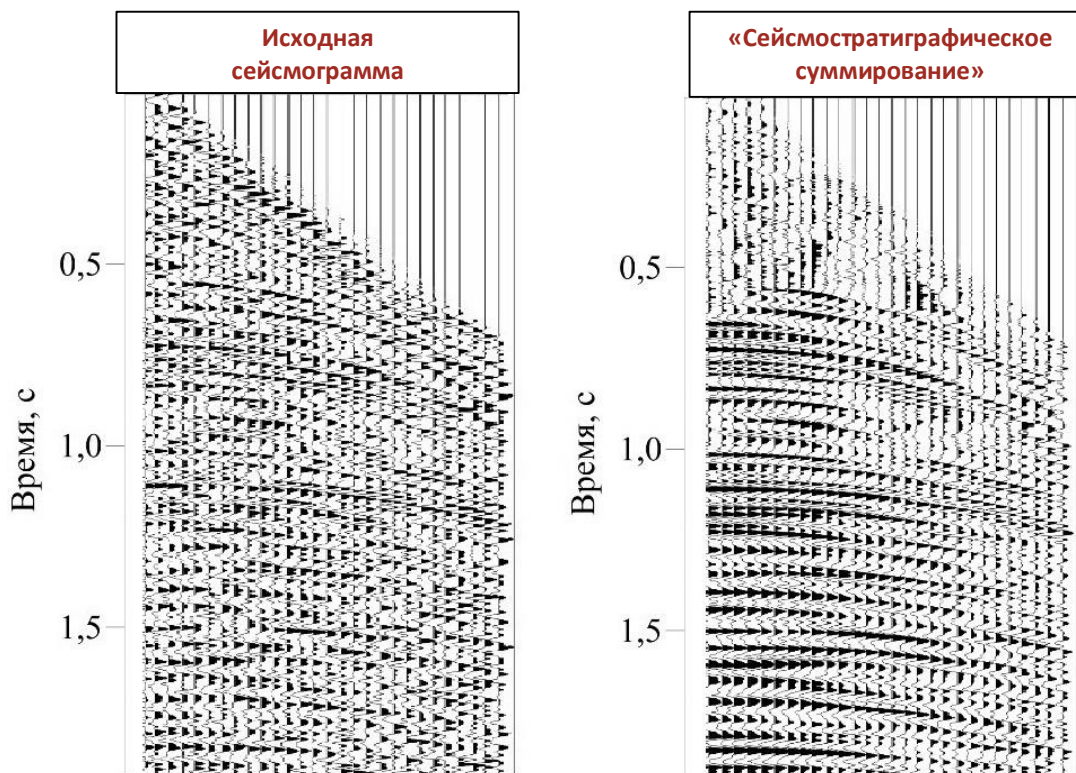


Рисунок 17 Сравнение сейсмограммы в исходном виде и после обработки методом «Сеймостратиграфического суммирования»

3.2.2. Построение разрезов методом RGB

При формировании стандартных сейсмических изображений цвет в каждой точке изображения определяется интенсивностью волны в этой точке, что нарушает понятие о сущности цвета с точки зрения его волновой природы. Метод построения разрезов RGB основан на том, что цвет пропорционален не интенсивности (энергии) сейсмических сигналов, а их частотным характеристикам. То есть при построении данных разрезов способ формирования цветового изображения соответствует физике цвета и его изменение связано с особенностями в составе и/или структуре изучаемой геологической среды.

Для того чтобы перейти к частотным составляющим волнового поля используется метод спектральной декомпозиции. Под данным методом понимается

разложение сейсмической записи на индивидуальные частотные компоненты. В целом, методы спектральной декомпозиции разделены на два типа. Первый тип основан на использовании преобразования Фурье. Второй в качестве алгоритмов расчета предполагает применение вейвлет-преобразования.

Преобразование Фурье по временной выборке (сейсмотрассе) осуществляет разложение в ряд гармонических колебаний, каждое из которых имеет собственную фазу и амплитуду. Результат данного преобразования – амплитудно-частотный спектр, по которому можно определить присутствие некоторой частоты в исследуемом сигнале. В случае необходимости вычислить временной интервал присутствия этой частоты классического преобразования Фурье недостаточно. Для этого используются другие методы, одним из которых является оконное (кратковременное) преобразование Фурье. При использовании данного метода создается временное «окно», которое последовательно перемещается вдоль трассы и выполняет преобразование только внутри окна. Данный подход позволяет определить факт присутствия спектра частот в определенном временном интервале, что значительно расширяет возможности метода по сравнению с классическим преобразованием Фурье. Недостатки оконного преобразования Фурье возникают в связи с принципом Гейзенберга, согласно которому невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала. В качестве метода, не обладающего недостатками подобного рода, был предложен аппарат вейвлет-анализа (Давыдов, 2010; Копысов, 2012).

В вейвлет-преобразовании анализируется функция – вейвлет $\psi((t-b)/a)$, где b – сдвиг, a – масштаб. Под вейвлетом понимается обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых получение всех функций осуществляется из одной базовой посредством ее сдвигов и растяжений по оси времен (Яковлев, 2003; Давыдов, 2010). Аппарат вейвлет-анализа несколько сложнее по сравнению с методами, основанными на преобразовании Фурье, однако применение вейвлетов позволяет перейти в частотно-временное представление сигнала, что является значительным преимуществом данного метода (Копысов, 2012; Грибунин, 2013; Буторин, 2016).

Наиболее распространенной технологией визуализации результатов спектральной декомпозиции является RGB-смешивание (Red, Green, Blue). Метод спектральной декомпозиции с последующим смешиванием в цветовом пространстве RGB получил широкое применение в атрибутивном анализе при выделении углеводородных резервуаров, изучении маломощных геологических объектов,

картировании палеорусел, палеоканалов и сложных систем разрывных нарушений (Guo, 2008; Никульников, 2012; Буторин, 2016; Кирьянова, 2016).

Непосредственно для временных разрезов МОВ-ОГТ и НСП, проходящих через озеро Байкал, спектральная декомпозиция была выполнена иным способом, основанном на полосовой фильтрации сигнала. При вычислении спектральной декомпозиции для исходных разрезов (рис. 18 - А) полосы частот определялись из условия равенства энергий трех участков амплитудного спектра (рис. 18 - В). Так, для разреза по профилю 50 распределение соответствовало следующим частотным диапазонам: низкочастотный: 6 - 17 Гц, среднечастотный: 17 - 29 Гц, высокочастотный: 29 – 55 Гц. Для частотных компонент, полученных при спектральном разложении (рис. 18 - С), с помощью преобразования Гильберта была вычислена интенсивность (рис. 18 - D). Рассчитанная таким образом интенсивность компонент пропорциональна трём цветам: красный соответствует низкочастотной составляющей, зеленый - среднечастотной, синий - высокочастотной. При получении в каждой точке изображения трёх цветов, пропорциональных трём частотным компонентам, осуществляется их смешивание и построение нового разреза, названного разрезом RGB (рис. 18 - E) (Guo, 2008; Гриценко, 2014).

Разложение на частотные составляющие (рис. 18 - С) осуществлялось тремя способами (рис. 19):

1. во всём временном интервале;
2. в постоянном скользящем по трассе окне;
3. в скользящем окне, зависящем от средней частоты компоненты.

Наиболее близким к результатам декомпозиции по вейвлет-алгоритму является 3-ий способ, осуществляющий полосовую фильтрацию в скользящем окне, зависящем от средней частоты компоненты. Размер окна равен заданному количеству периодов соответствующей компоненты. Полученные таким способом разрезы характеризуются более высокой разрешающей способностью по сравнению с другими двумя способами и тонкие, маломощные слои выделяются более контрастно. В то же время при рассмотрении общей структуры изучаемого района эффективны разрезы, построенные с использованием первого способа (декомпозиция на всём временном интервале). На данных разрезах более ярко проявлена разница в цветах между низко-, средне- и высокочастотными составляющими и крупные сейсмические комплексы отображаются более наглядно. Второй способ декомпозиции (в постоянном скользящем по трассе окне) занимает промежуточное положение между первым и третьим.

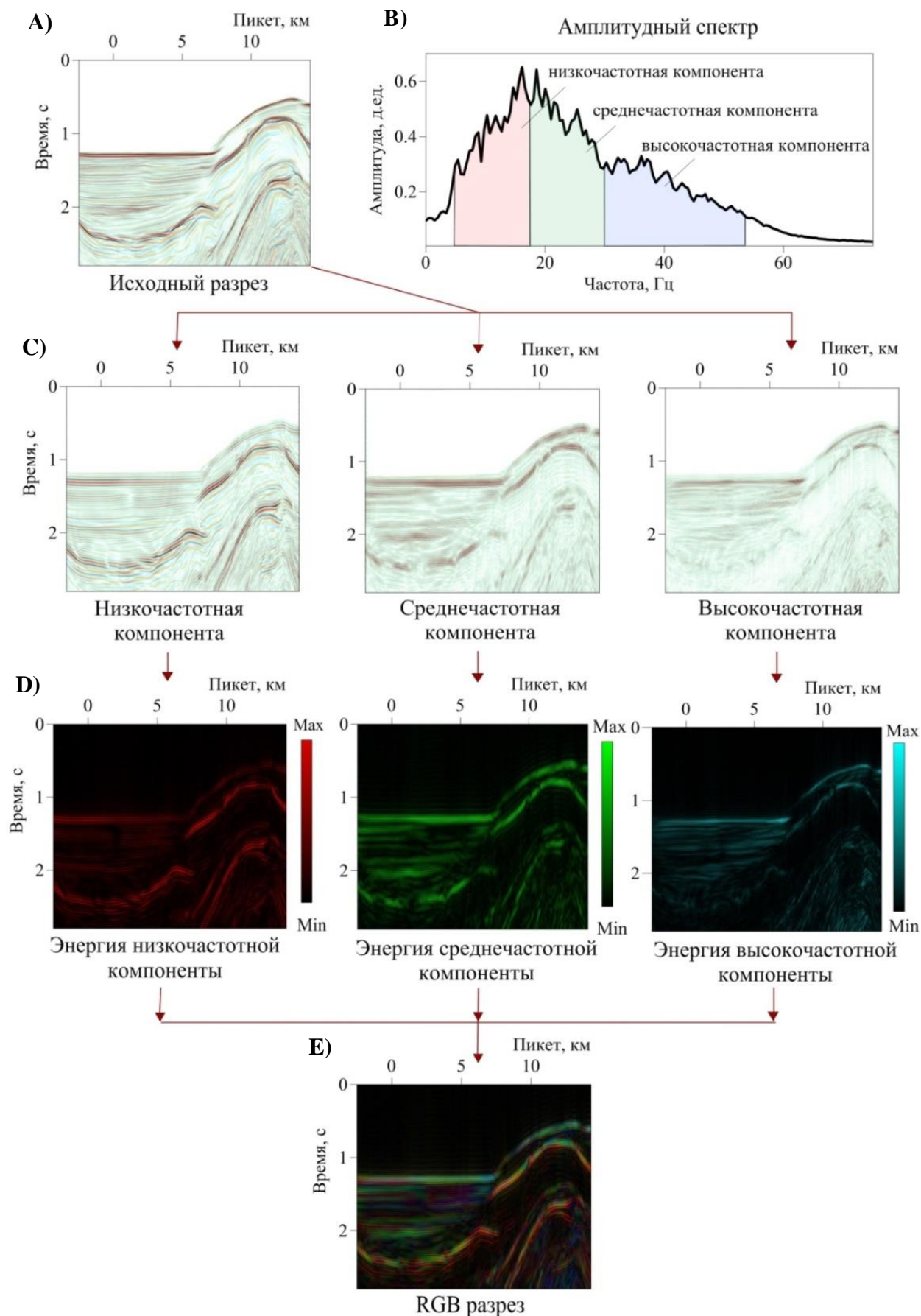


Рисунок 18 Схема построения RGB разреза на примере разреза по 50 профилю;
 А) Исходный сейсмический разрез, В) Амплитудный спектр сигнала, С) Разрезы, рассчитанные по трем частотным компонентам, Д) Разрезы интенсивности частотных компонент, Е) RGB разрез

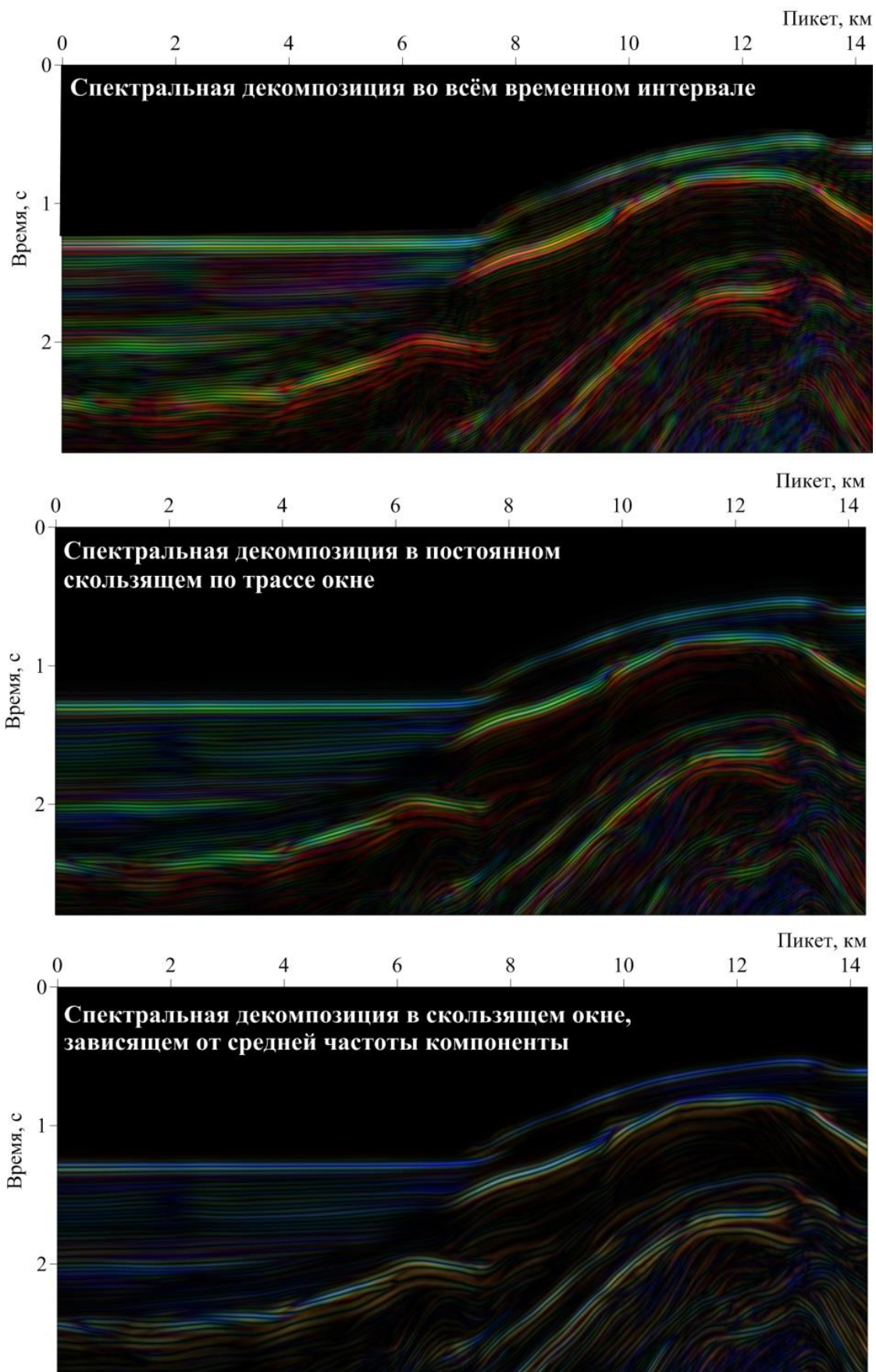


Рисунок 19 RGB разрезы по профилю 50 с использованием трех способов спектральной декомпозиции

Применение метода спектральной декомпозиции с последующим цветовым комбинированием RGB позволяет повысить информативность результатов интерпретации волнового поля по сравнению со стандартным подходом, основанным на оценке распределения амплитуд. Разрезы RGB, полученные в результате применения данного метода, характеризуются более контрастным представлением интересующих геологических объектов. На рассмотренном разрезе (рис. 20), например, ярче выделяется слоистый характер записи сейсмического комплекса, начиная от разрывного нарушения (7 км; 1.7- 1.9 с), более интенсивно проявляется отражающий горизонт, выходящий из точки (8 км; 2.5 с).

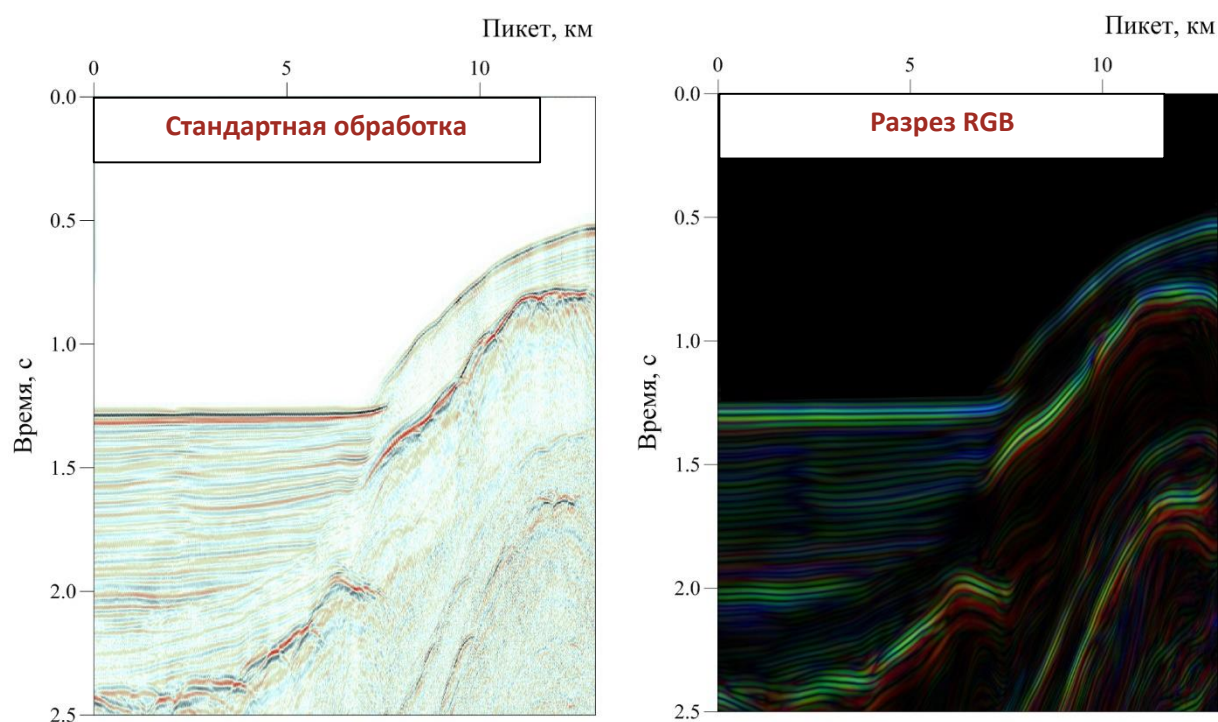


Рисунок 20 Фрагмент разреза МОВ-ОГТ по профилю 50 после стандартной обработки и обработки методом спектральной декомпозиции с последующим RGB-смешиванием

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На современной стадии исследований при рассмотрении вопроса о возрасте и развитии Байкала обязательным является сеймостратиграфический анализ его осадочного чехла и фундамента.

4.1. Стратификация горизонтов

При интерпретации сейсмических разрезов МОВ-ОГТ и НСП, проходящих через озеро Байкал, было выделено несколько отражающих горизонтов: граница фундамента «F», границы, соответствующие ольхонской и нюрганской тектоническим фазам («B6» и «B10») и горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR».

Определение границы фундамента является одним из наиболее важных и дискуссионных вопросов при изучении Байкала. На сейсмических разрезах под границей фундамента понимается сейсмический горизонт, ниже которого отраженные сейсмические волны не регистрируются или проявлены крайне слабо. Его поверхность характеризуется неровным, расчлененным рельефом (рис. 21). Граница фундамента Байкальской котловины соответствует подошве верхнемеловых-кайнозойских отложений осадочного чехла. Положение данного горизонта было выявлено различными методами (МОВ, МПВ) и представлено в независимых друг от друга работах (Hutchinson, 1992; Зоненшайн, 1992; Крылов, 1995; Brink, 2002; Суворов, 2005; Мац, 2012; 2015).

Среди толщ осадочного чехла были прослежены два опорных отражающих кайнозойских горизонта, наиболее выдержанные по всей акватории озера и имеющие стратиграфическую привязку по скважинам: «B6» (середина плиоцена) и «B10» (середина эоплейстоцена).

Горизонт «B10» соответствует границе несогласия, вызванной нюрганской тектонической фазой, характеризующейся интенсивным рифтогенезом, резкой сменой характера осадконакопления по всей Байкальской территории и быстрым глубоким погружением дна Байкальской впадины (Kuzmin, 2000; Мац, 2012, 2015). С данной фазой связано изменение характера тектонических напряжений, что привело к изменению структуры отложений — деформированные слои сменились недеформированными (граница между толщами «А» и «В» на рисунке 6). Данная граница относится к типу несогласия трансгрессивного прилегания (рис. 21) (Moog, 1997; Мац, 2012). Положение горизонта «B10» подтверждено скважинами ВDP – 96 и ВDP – 98 (Кузьмин, 2001).

Сейсмический горизонт «В6» (рис. 21) соответствует ольхонской тектонической фазе, разделяющей два этапа развития Байкальского рифта: ранне- и позднеорогенный. За время существования ольхонской тектонической фазы происходил рост рифтовых плеч, острова Ольхон и Святоносского блока (Мац, 2012, 2015). Положение данной границы зафиксировано в самой глубокой на озере Байкал скважине ВDP – 98 (Кузьмин, 2001). Граница «В6» связана с переходом от мелководных фаций к глубоководным мелкозернистым отложениям, связанным с резким увеличением скорости понижения дна Байкала (Moog, 1997; Kuzmin, 2000). Данная граница делит сейсмический комплекс «В» (рис. 6) на 2 части: верхняя тонкослоистая пачка (В6 - В10), которая формировалась в спокойных озерных условиях, и нижняя пачка (В5 – В6), накопление которой осуществлялось в районе дельты Палеобаргузина (Кузьмин, 2001).

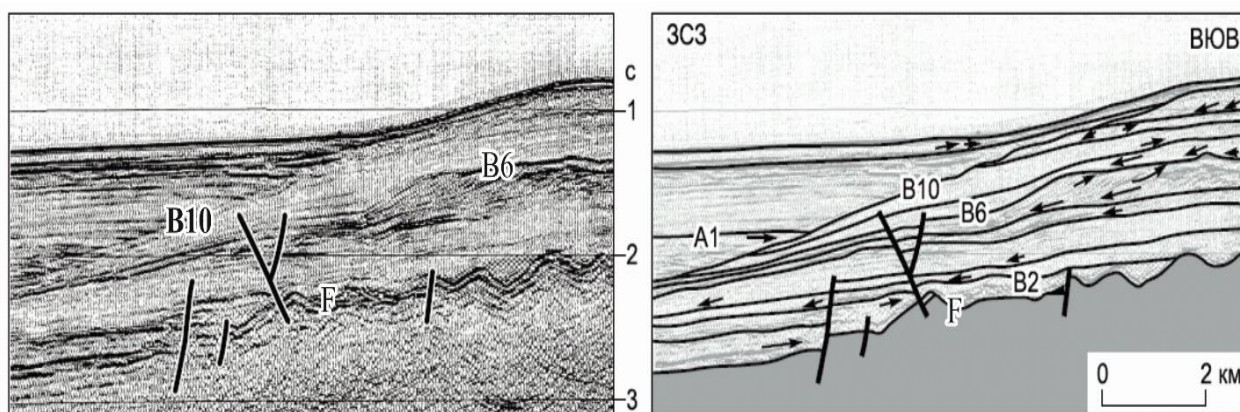


Рисунок 21 Фрагмент профиля 58 через южную часть Северобайкальской впадины (Moog, 1997) с изменениями (Мац, 2012)

В осадочных отложениях Байкала был выделен и прослежен сейсмический отражающий горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR» (bottom simulating reflectors). Нижняя граница слоя газогидратов определяется изолинией термобарического поля в осадочной толще. Упругие свойства слоя газовых гидратов существенно отличаются от среды ниже подошвы BSR, поэтому на этой границе образуется достаточно мощное отражение, которое имеет отрицательную полярность в связи с наличием свободного газа в подстилающих отложениях. Так как изолиния термобарического поля не всегда совпадает с направлением слоистости в среде, то такое отражение на временных разрезах может пересекать отражения, связанные с изменением упругих свойств, вызванных литологическими особенностями пород (рис. 22). Также отмечена параллельность границы BSR дну озера с ее постепенным погружением в сторону увеличения глубины. Данные свойства являются важнейшими признаками отражений от подошвы газовых гидратов по сейсмическим данным (Гинсбург, 1994; Гольмшток, 1997).

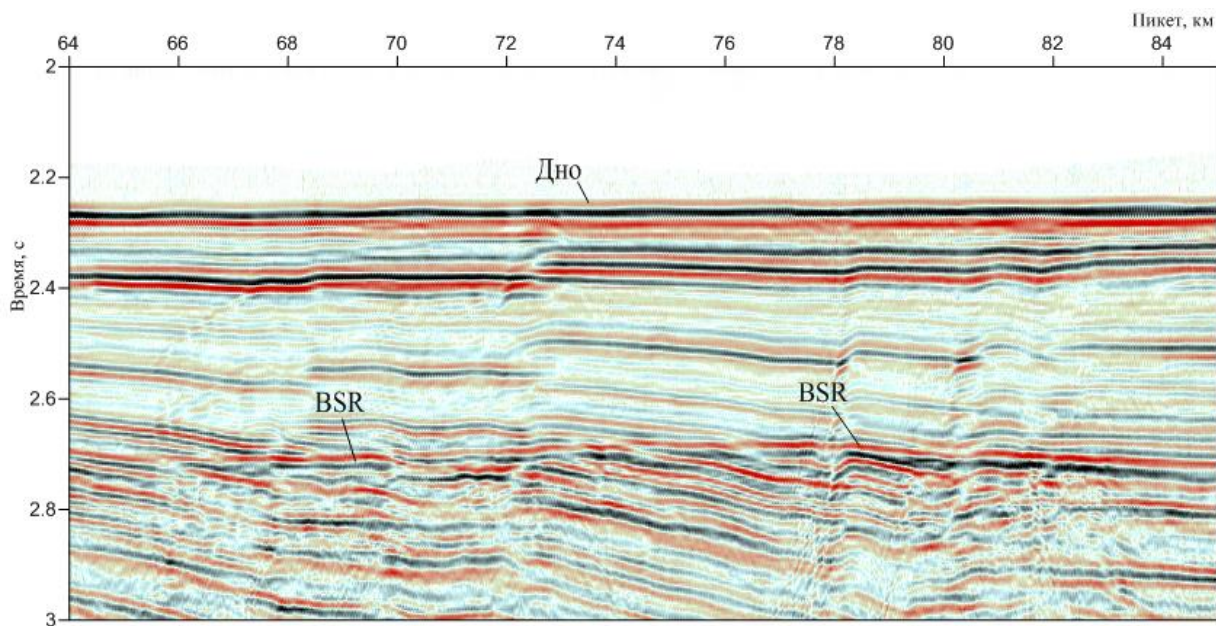


Рисунок 22 Фрагмент сейсмического разреза МОВ-ОГТ по профилю 13

Кроме того, при прослеживании горизонтов особое внимание уделялось выявлению разрывных нарушений и их сопоставлению с имеющимися данными о тектоническом строении района работ. В результате, помимо крупных региональных разломов, были выделены контуры предполагаемых локальных разрывных нарушений.

4.2. Прослеживание горизонтов

Применение дополнительных способов обработки к имеющимся сейсмическим материалам МОВ-ОГТ и НСП позволило более уверенно идентифицировать отражающие сейсмические горизонты Байкальской котловины.

На рисунке 23 представлены исходный и переобработанные методом «Сеймостратиграфического суммирования» и RGB разрезы МОВ-ОГТ по профилю, проходящему через Академический хребет и Маломорско-Езовскую впадину. Данный разрез пересекает 2 скважины ВDP-96 и ВDP-98, по которым осуществлялась привязка сейсмических горизонтов «В6» и «В10». На переобработанных разрезах отчетливо видна граница «В10», отделяющая тонкослоистый слабдеформированный комплекс пород (возрастом моложе плейстоцена) от сильно дислоцированного более древнего комплекса пород. Вышележащий комплекс имеет значительные вариации мощности в районе Академического хребта (менее 200 м) и в Маломорско-Езовской впадине (до 500 м), что объясняется разными источниками осадконакопления. На хребет, отделенный от берега глубоководными котловинами, осадки поступали только из водной толщи, в то время как в Маломорско-Езовской впадине осуществлялось поступление осадков с береговой

линии. Граница «В6» имеет интенсивное отражение и сразу выделяется как на переобработанном, так и на исходном разрезе. Толща пород, находящаяся между сейсмическими горизонтами «В6» и «В10», характеризуется тонкой горизонтальной слоистостью и непостоянством мощности (от 250 до 1000 м). Ниже по разрезу от горизонта «В6» до кровли фундамента «F» слоистость пород имеет постепенный переход от четких, интенсивных к слабо заметным, порой пропадающим сейсмическим отражениям. Породы фундамента (ниже горизонта «F») имеют хаотический характер записи и расчлененный, неровный рельеф поверхности. Следует добавить, что сложный рельеф и крутое падение пород фундамента во многом определяются соотношением горизонтального и вертикального масштабов, которое несколько искажает представление о реальном залегании пород.

Метод спектральной декомпозиции с последующим RGB-смешиванием показал хорошие результаты при выделении границы фундамента «F» (рис. 24). Данная граница на полученных RGB разрезах отмечена интенсивным ярко красным цветом, связанным с преобладанием низкочастотной компоненты. Так, на фрагменте исходного разреза (интервал от 70 до 80 км) отражающий горизонт, соответствующий границе фундамента, пропадает, в то время как на RGB разрезе горизонт «F» отчетливо виден и может быть прослежен на большую глубину.

Переобработка данных НСП позволила проследить границу «В10» до самого северного окончания озера и выделить мощную тонкослоистую толщу пород возрастом плейстоцен-голоцен. На рисунке 25 приведен пример разреза НСП по профилю 113 до и после переобработки. Данные разрезы демонстрируют значительно меньшую глубинность и не дают возможности проследить горизонты, относящиеся к более древним границам и несогласиям. Не наблюдается на разрезах и четкой границы, соответствующей особенностям сейсмического горизонта подошвы газогидратного слоя «BSR». Однако разрешенность разрезов НСП позволяет выделить более тонкие слои в разрезе, которые значительно контрастнее выделяются на переобработанных разрезах «Сеймостратиграфического суммирования» и на разрезах RGB, что может быть использовано при дальнейшем более детальном сеймостратиграфическом анализе данной территории.

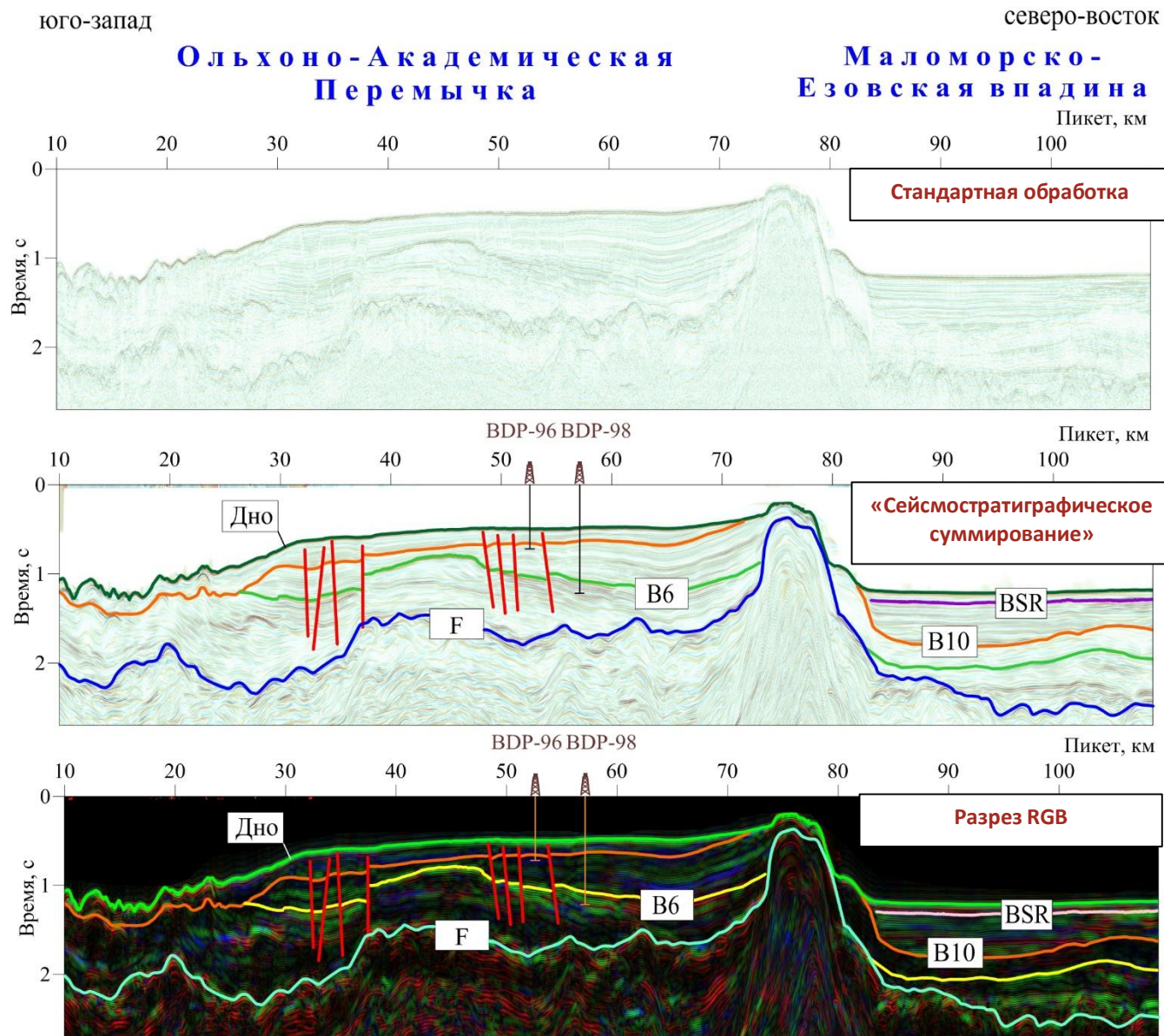
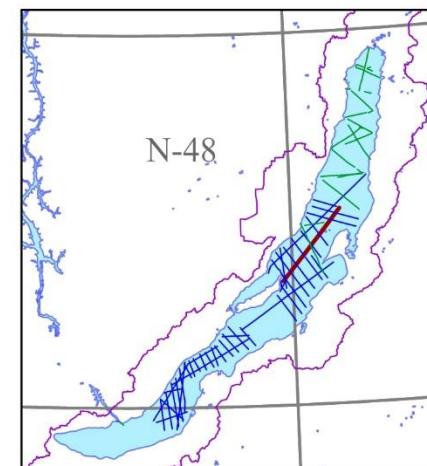


Схема профилей



Условные обозначения:

- дно озера Байкал
- подошва газогидратного слоя (BSR)
- граница несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой (B10)
- граница несогласия, возможно, соответствующая ольхоноской тектонической фазе (B6)
- кровля дорифтового фундамента (F)
- разрывные нарушения

Рисунок 23 Сравнение различных вариантов разреза МОВ-ОГТ по профилю 15

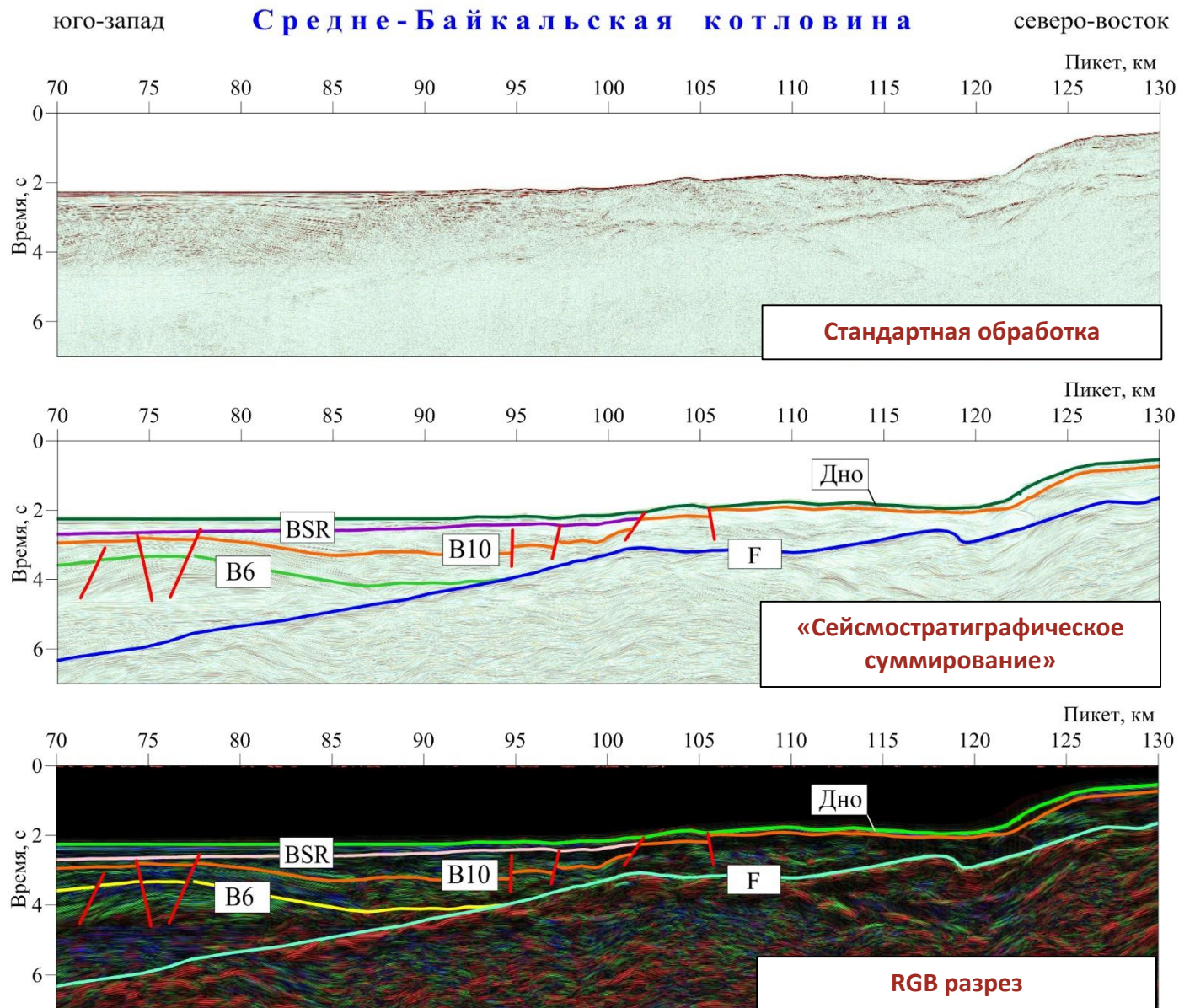
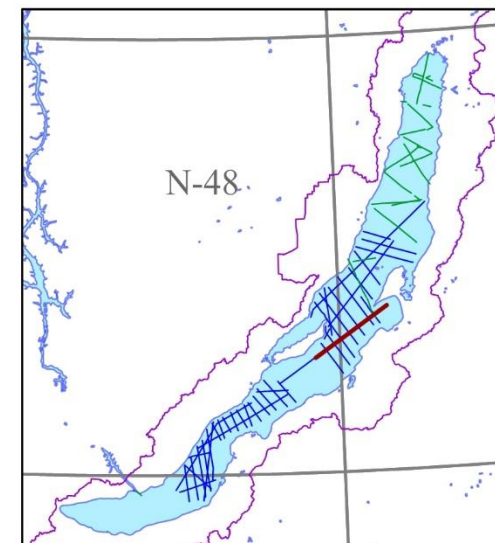


Схема профилей



Условные обозначения:

- дно озера Байкал
- подошва газогидратного слоя (BSR)
- граница несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой (B10)
- граница несогласия, возможно, соответствующая ольхонской тектонической фазе (B6)
- кровля дорифтового фундамента (F)
- разрывные нарушения

Рисунок 24 Сравнение различных вариантов разреза МОВ-ОГТ по профилю 13

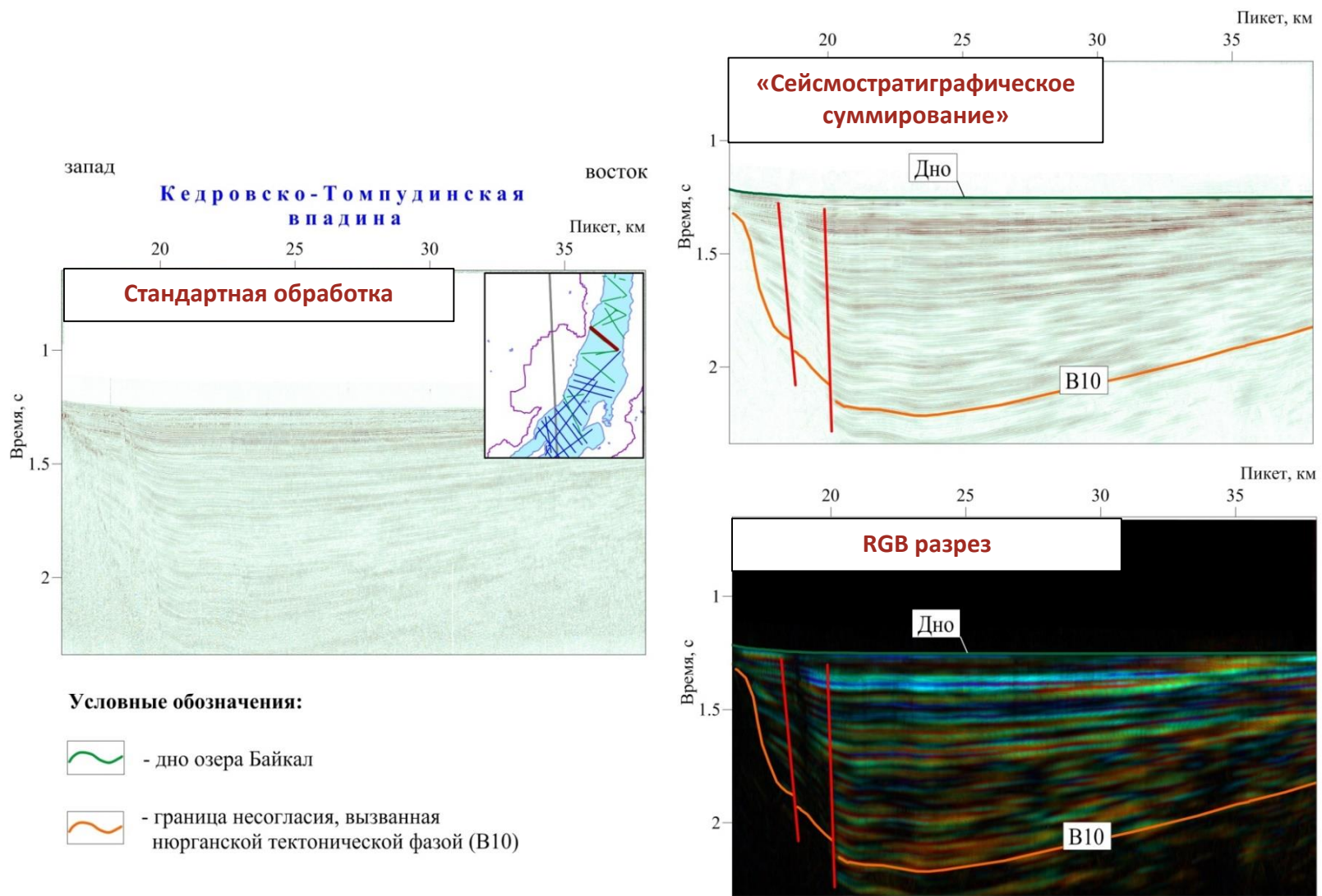


Рисунок 25 Сравнение различных вариантов разреза НСП по профилю 113

Применение метода «Сейсмостратиграфического суммирования» для сейсмограмм в ряде случаев позволило выделить горизонт, отождествляемый с подошвой газогидратного слоя «BSR», на участках, где на исходных разрезах данная граница была либо проявлена слабо, либо совсем не видна. В частности, на разрезах, проходящих через Маломорско-Езовскую впадину (Северная котловина озера) (рис. 26). Учитывая особенности горизонта BSR, на временных разрезах было найдено отражение с отрицательной полярностью, секущее плоскости напластования пород. Такое проявление границы, предположительно соответствующей подошве газовых гидратов, на временных разрезах северной котловины опровергает теорию об их полном отсутствии в данной части озера в связи с недостаточным количеством газа (Дучков, 2003; Бычинский 2008).

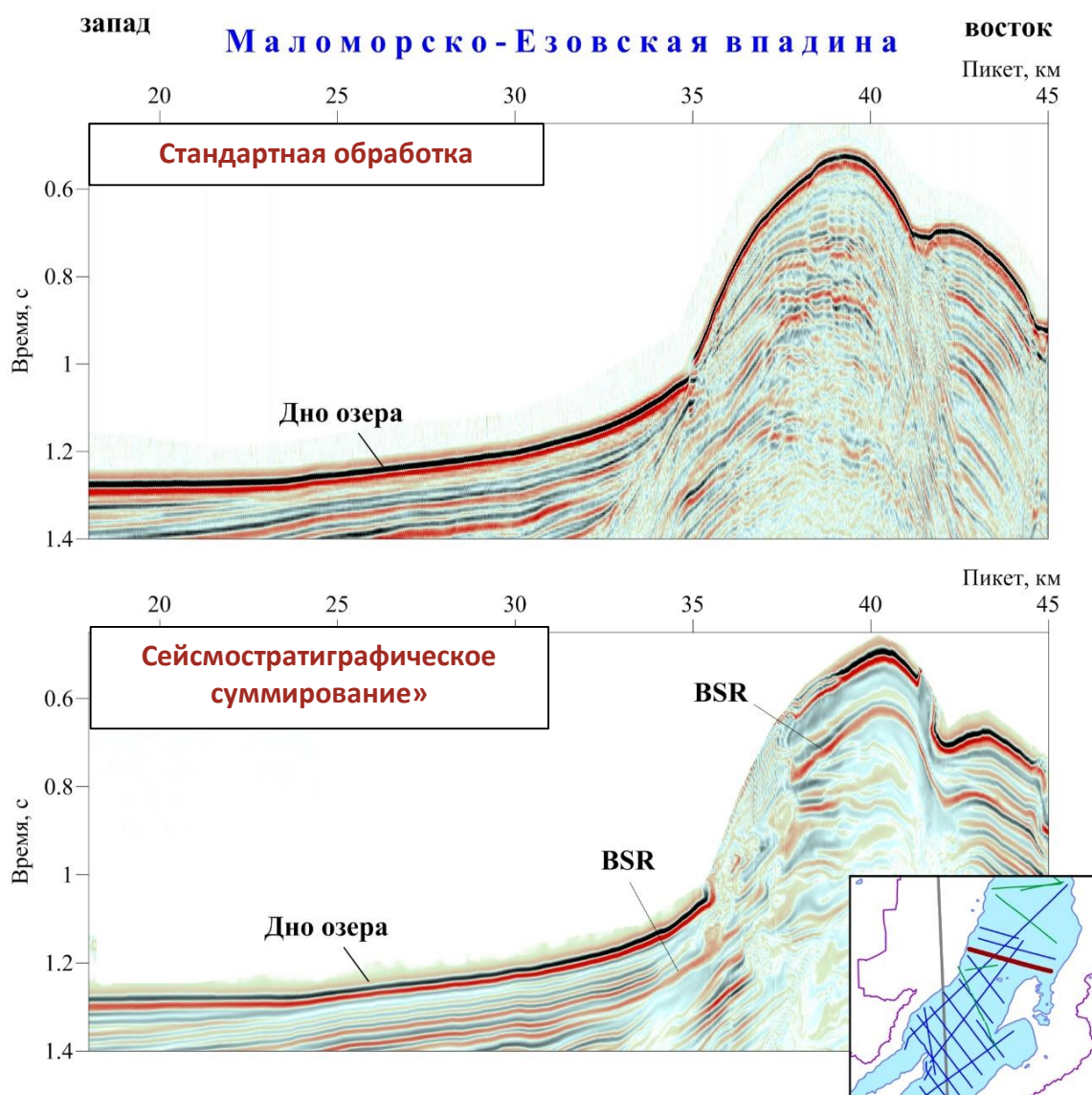


Рисунок 26 Пример выделения горизонта «BSR» на разрезе МОВ-ОГТ по профилю 56 после обработки методом «Сейсмостратиграфического суммирования»

4.3. Построение структурных карт и карт мощностей

По результатам прослеживания отражающих горизонтов озера Байкал были рассчитаны несколько структурных карт и карт мощностей. Перед их расчётом в системе CubeTechnology осуществлялось сглаживание горизонтов на базе 1 км и минимизация невязок на пересечениях профилей. Для перехода от времен к глубинам использовался метод пересчета карт изохрон с применением скоростной модели, разработанной (Гольмшток, 1997). На рисунке 27 представлена рассчитанная таким образом структурная карта для Центральной и Южной котловин озера по кровле фундамента «F». Карта мощности осадочного чехла озера Байкал (рис. 28) была получена при вычитании батиметрической карты из структурной.

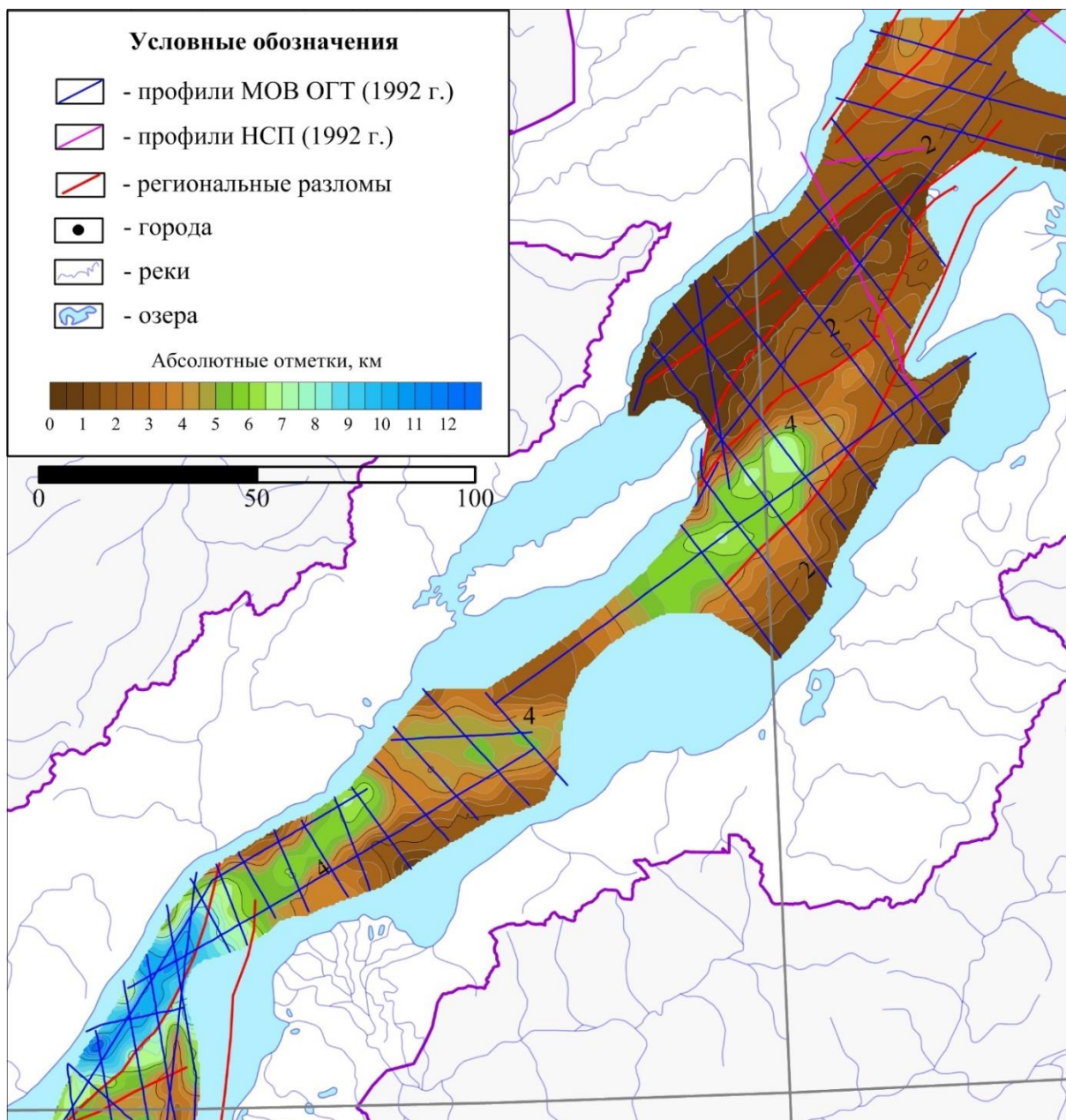


Рисунок 27 Структурная карта по кровле фундамента озера Байкал

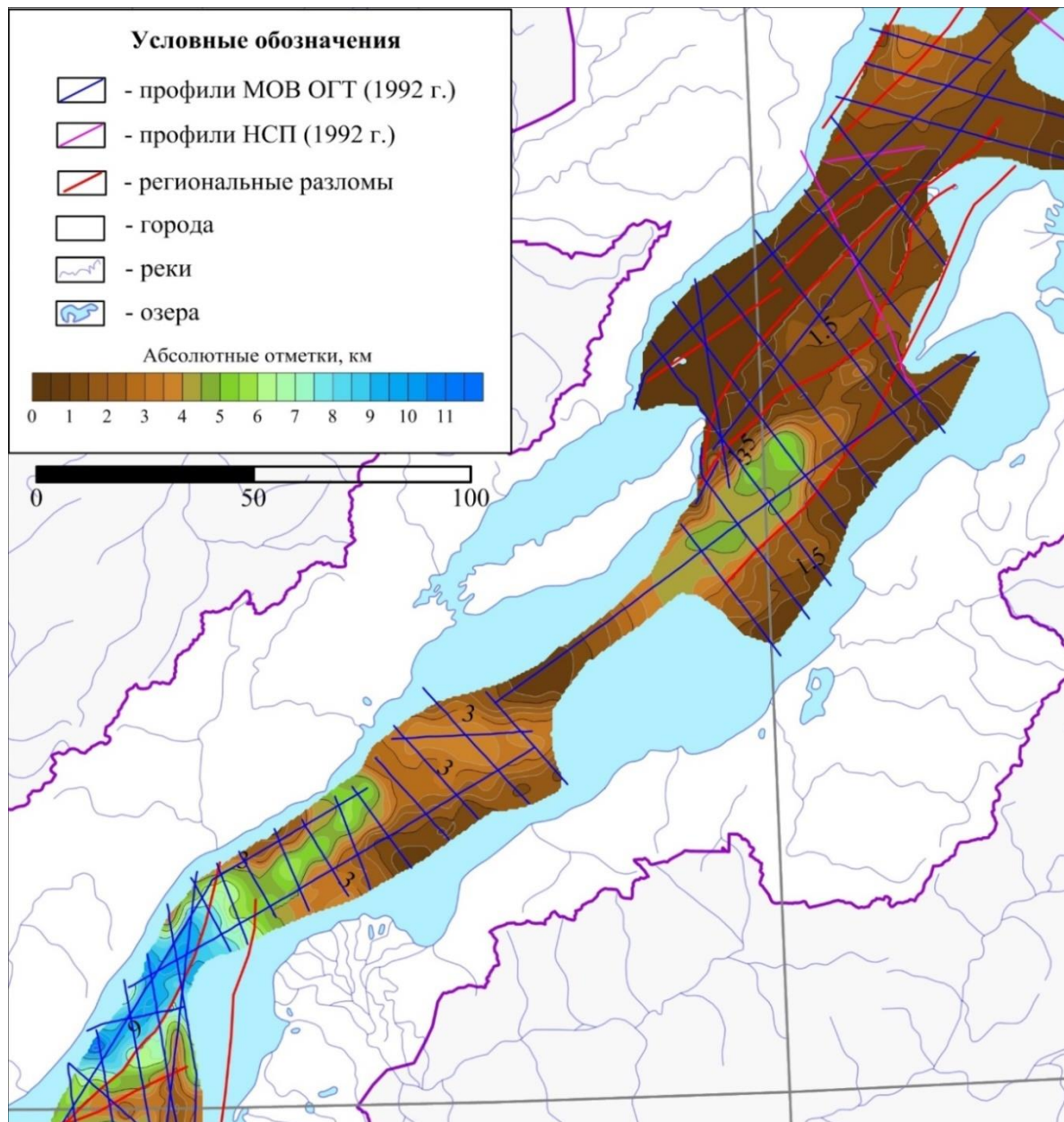


Рисунок 28 Карта мощности верхнемелового-кайнозойского осадочного чехла озера Байкал

По результатам построения данных карт были сделаны следующие выводы:

- Три глубоководных котловины озера Байкал выстланы мощными осадочными отложениями (средняя мощность 4 - 4,5 км);
- Зона максимального погружения фундамента охватывает юго-западный внешний край дельты Селенги, где мощность осадочного чехла достигает 11,5 км. Такая значительная мощность связана с накоплением огромного количества осадков, выносимых рекой;
- Выступы фундамента, образующие «пороги» между данными котловинами, контролируются крупными дизъюнктивными нарушениями, связанными в единую сеть.

- В северной части озера (Кедровско-Томпудинская впадина) дорифтовый фундамент выходит ближе к поверхности и перекрыт осадками мощностью не более 3,5 км.

Для Центральной и Северной котловин озера была построена структурная карта по отражающему горизонту «В10» (рис. 29) и карта мощности осадочного комплекса плейстоцен-голоценовых пород, расположенного выше по разрезу от данной границы (рис. 30).

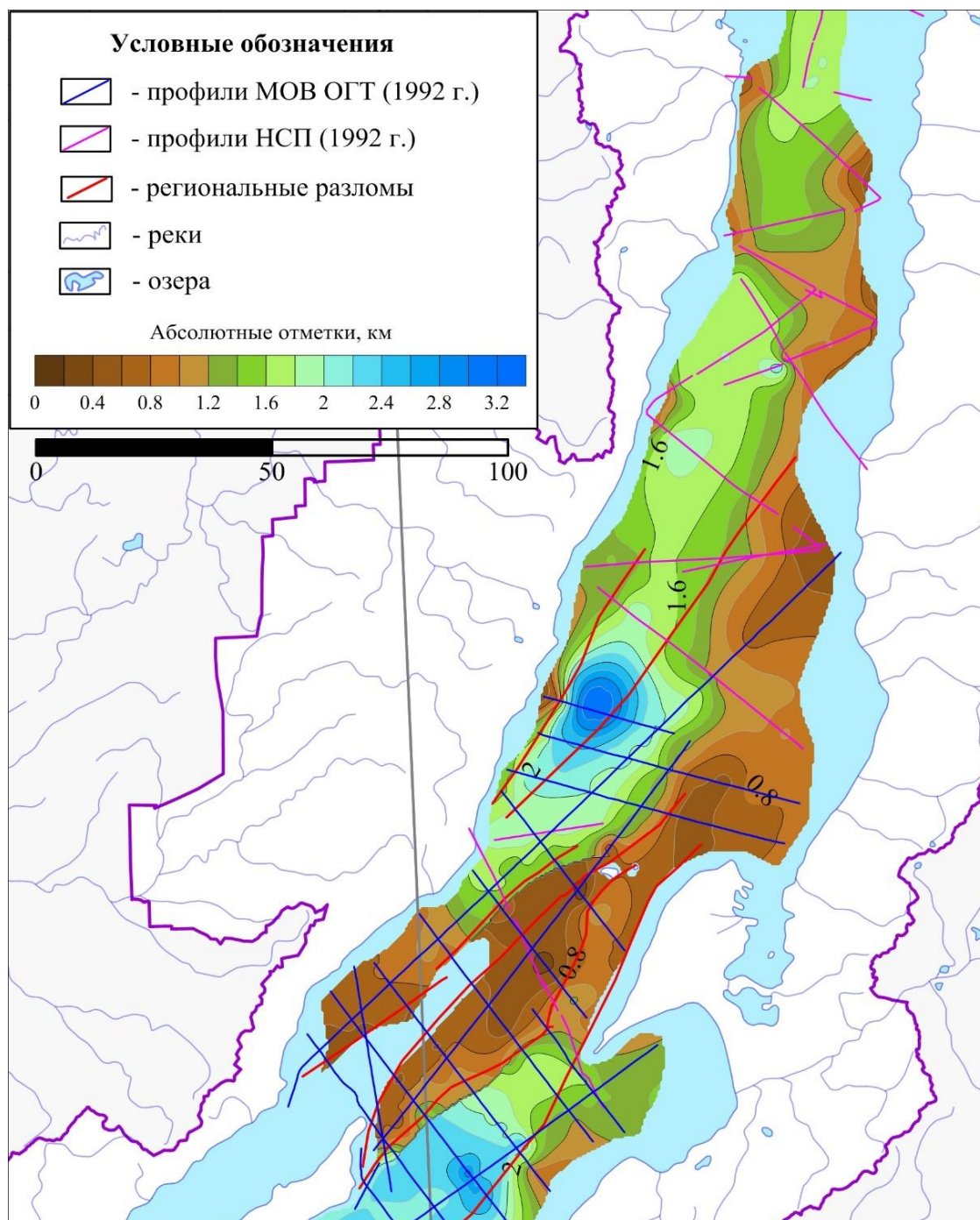


Рисунок 29 Структурная карта по отражающему горизонту «В10», соответствующему границе несогласия, вызванной нюрганской тектонической фазой

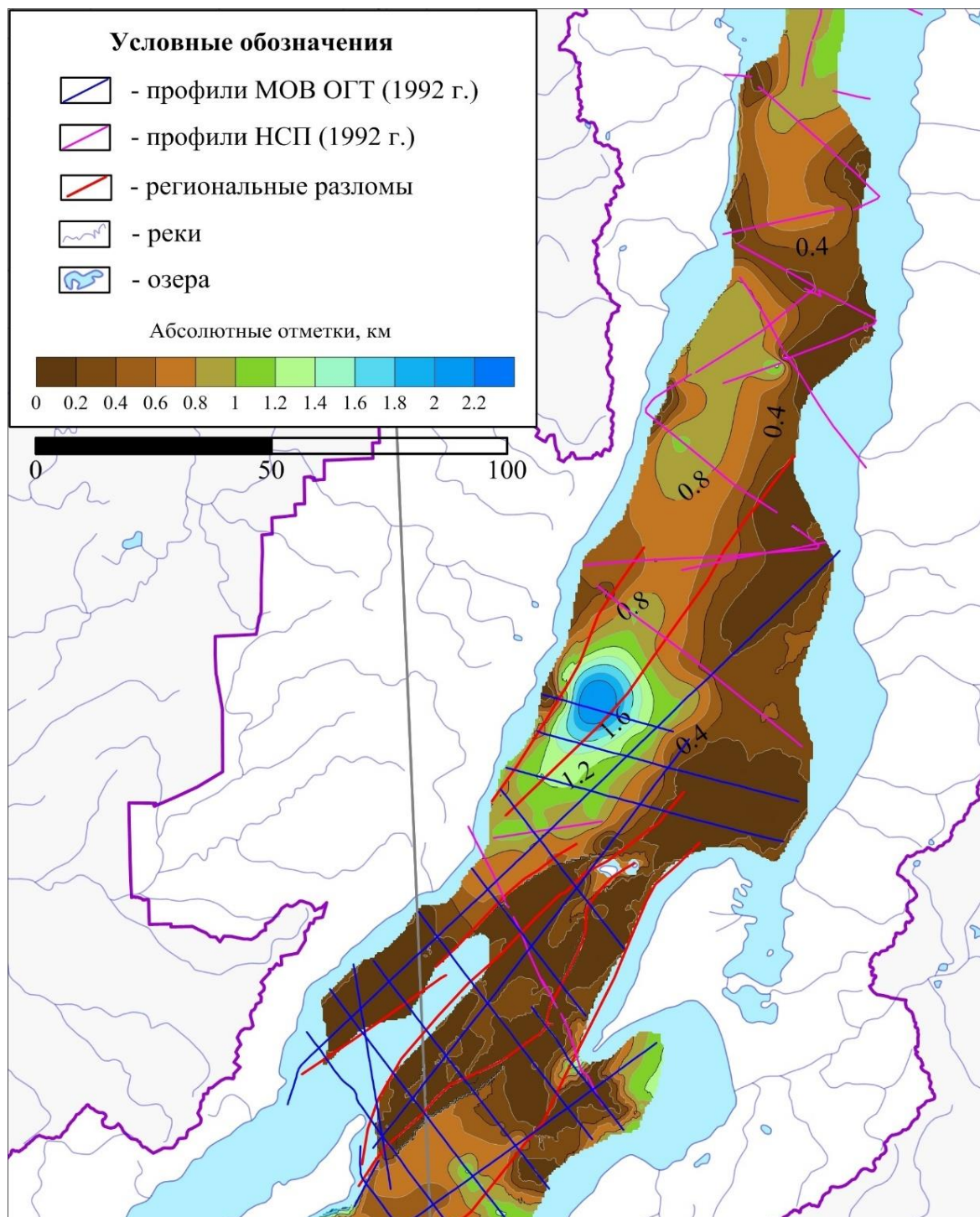


Рисунок 30 Карта мощности плейстоцен-голоценового комплекса пород до отражающего горизонта «В10»

По полученным картам для горизонта «В10», соответствующего границе несогласия, вызванной нюрганской тектонической фазой, видно, что за период времени от плейстоцена до голоцена в Северной котловине Бакала осуществлялось образование мощной седиментационной ванны, где толщи осадков достигают 2.2 км в осевой части впадины. Значительно меньшие мощности (от первых сотен метров) накапливались в

районе Академического хребта, где осадконакопление осуществлялось только из водной толщи, и в приближенных к берегу участках, с которых основной поток осадочного материала переносился вглубь бассейна.

При анализе структурной карты по горизонту «BSR» (рис. 31) и карты мощности газогидратного слоя (рис. 32) было отмечено, что залежи газовых гидратов имеют распространение в северном и южном направлении от дельты Селенги, которая является основным источником органического вещества в акваторию.

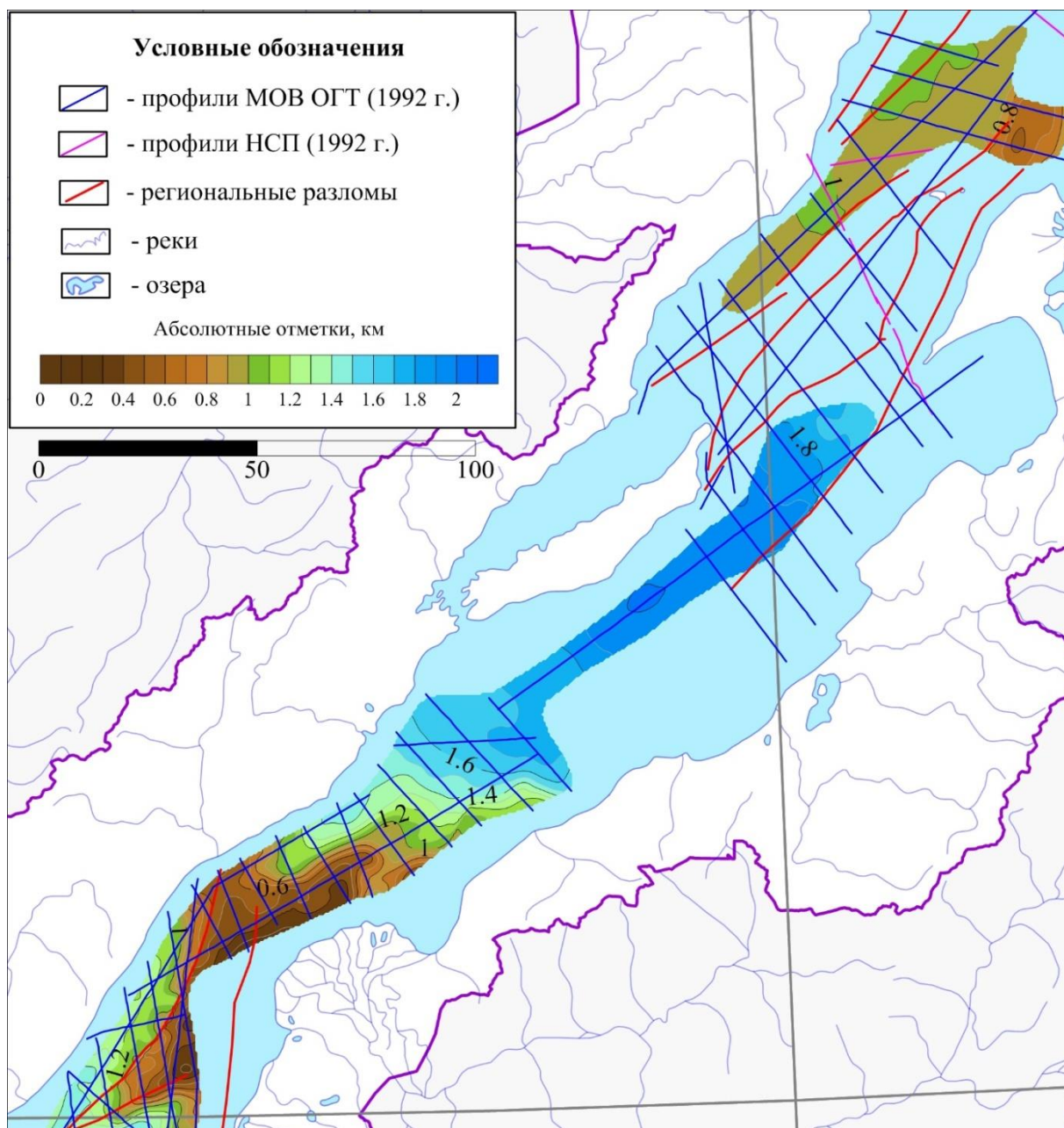


Рисунок 31 Структурная карта по подошве газогидратного слоя

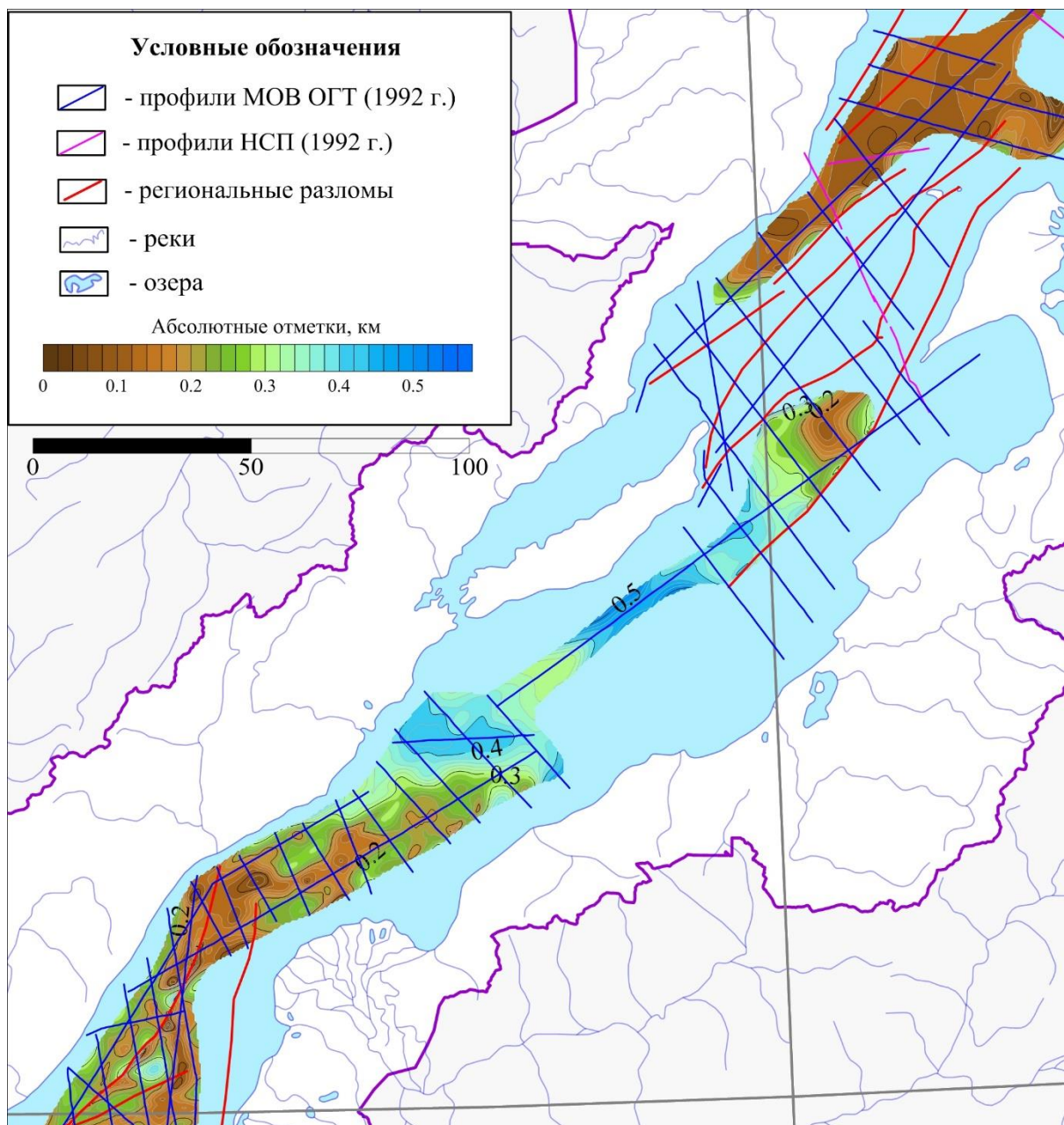


Рисунок 32 Карта мощности газогидратного слоя

По результатам интерпретации газогидраты на акватории Байкала присутствуют только на глубинах более 350 м. Мощность газогидратного слоя в целом варьирует от 30 до 550 м (в среднем 260 м). Максимальная мощность отмечена в наиболее глубокой Центральной котловине озера. Минимальная мощность слоя газогидратов характерна для Маломорско-Езовской впадины (Северная котловина Байкала). В Южной котловине наблюдается погружение границы «BSR» в юго-западном направлении от Бугульдейско-Селенгинской перемычки, что дает возможность предположить о еще большей мощности слоя газовых гидратов в данной впадине. Пустые фрагменты на карте связаны с отсутствием сейсмических данных или с невозможностью их выделения в горизонтальных толщах, а также в зонах разгрузки газа, приуроченных к

дизъюнктивным нарушениям. Построенные карты для газогидратного слоя существенно расширяют сведения о гидратах Байкала по сравнению с полученными ранее результатами интерпретации (рис. 33) и демонстрирует их большее распространение, захватывая Северную котловину озера.

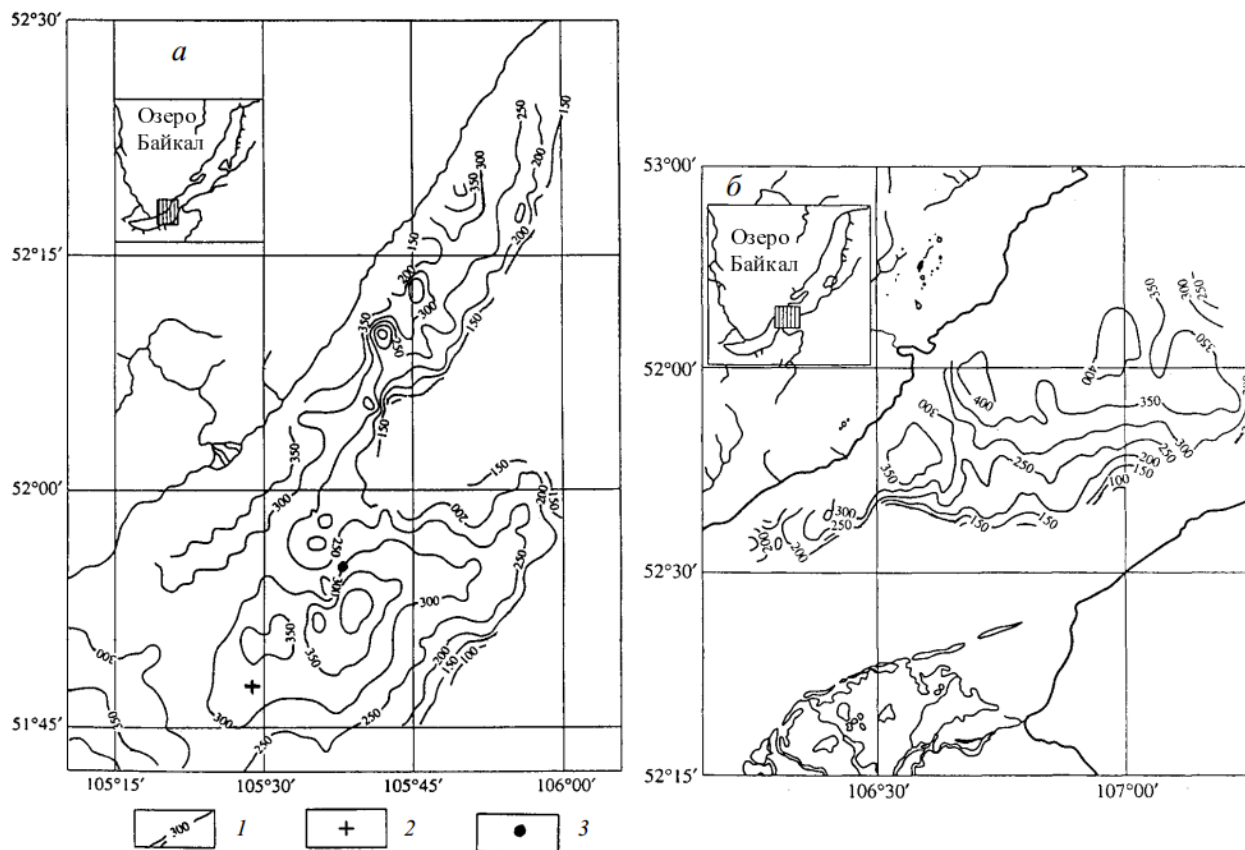


Рисунок 33 Карты мощности газогидратного слоя по сейсмическим данным в Южной (а) и Центральной (б) котловинах Байкала (Гольмшток, 1997; Golmshtok, 2000)

Следует отметить, что такие оценки глубин и мощностей являются приближенными, так как на акватории озера Байкал сведения о скорости распространения упругих волн по скважинным измерениям отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных технологий обработки сейсмических данных позволило повысить информативность сейсмических разрезов и уточнить геологическое строение озера Байкал:

- **Установлены особенности строения осадочного чехла и фундамента:**
 - три глубоководных котловины Байкала сложены мощными мезозой-кайнозойскими осадочными отложениями (в среднем 4 - 4,5 км) и разделены выступами фундамента, контролируемые крупными дизъюнктивными нарушениями, связанными в единую систему;
 - минимальная мощность осадочного чехла (первые сотни метров) наблюдается в районе Академического хребта, максимальная (11.5 км) отмечена в юго-западной части внешнего края дельты Селенги;
 - плейстоцен-голоценовый комплекс пород, ограниченный границей несогласия «В10», вызванной нюрганской тектонической фазой, формирует огромную седиментационную ванну мощностью до 2.2 км в Северной котловине озера.
- **Уточнены зоны проявления газовых гидратов и оценена их предполагаемая мощность:**
 - газогидраты присутствуют на акватории озера Байкал, где его глубины превышают 350 м;
 - выявлено наличие слоя газовых гидратов в Северной котловине озера, где они имеют минимальную мощность (около 30 м);
 - максимальная мощность газогидратного слоя наблюдается в центральной части Средне-Байкальской котловины и достигает 550 м.
- **Выполнена оценка экологического состояния Байкальской природной территории:**
 - без антропогенного воздействия человека серьезную экологическую опасность газовые гидраты Байкала представляют только в случае мощных тектонических движениях озерного дна или глобального изменения климата.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доценту кафедры геофизики СПбГУ, Т.С. Сакулиной за руководство и помощь на всех стадиях выполнения работы, а также заведующему лабораторией методических разработок

ВСЕГЕИ, С.А Гриценко за оказанные им советы при выполнении обработки и интерпретации и ценные замечания по диссертации.

Список литературы

- 1) Адаменко О.М., Адаменко Р.С., Белова В.А., Ендрихинский А.С. О возрасте молассовых толщ Байкальской рифтовой зоны по фауне мелких млекопитающих // Среда и жизнь на рубежах эпох кайнозоя в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск, Наука. – С. 1984.
- 2) Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. - 456 с.
- 3) Байкал. Атлас / ред. Г.И. Галазий. – М.: Изд-во Федеральной службы геодезии и картографии России, 1993. – 96 с.
- 4) Базаров Д.Б. Кайнозой Прибайкалья и Западного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 181 с.
- 5) Байкал. Геология. Человек/ М.И. Грудинин, И.С. Чувашова. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. – 239 с.
- 6) Батиметрическая электронная карта озера Байкал / П.П. Шерстянкин // Докл. Академии наук. – 2006. – Т. 408, № 1. – С. 102–107.
- 7) Беличенко В.Г., Скляр Е.В., Добрецов Н.Л., Томуртогоо О. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // Геология и геофизика, 1994, т. 35, № 7-8, – С. 29–41.
- 8) Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение : учебное пособие. – Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. – 291 с.
- 9) Булдыгеров В.В. Проблемы геологии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса / В. В. Булдыгеров, В. Н. Собаченко. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2005. – 184 с.
- 10) Буторин А.В. Изучение детального строения ачимовского нефтегазоносного комплекса на основе спектральной декомпозиции сейсмического волнового поля – СПб : 2016. -141 с.
- 11) Бухаров А.А. Кайнозойское развитие Байкала по результатам глубоководных и сейсмостратиграфических исследований // Геология и геофизика. - 1996. - Т. 37, № 12. - С. 98—107.
- 12) Бык С.Ш. Газовые гидраты: монография / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина; Ред. С.Ш. Бык. - М. : Химия, 1980. - 296 с.
- 13) Бычинский В.А. Гидрогеология нефти и газа: учеб. пособие. Ч.1 / В.А. Бычинский, Н. Г. Коновалова. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – 221 с.

- 14) Грибунин В.Г. введение в вейвлет-преобразование, Iowa State University. 2013 – 59 с.
- 15) Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. - 199 с.
- 16) Гриценко С.А. Изображение геологических разрезов и определение скоростей методом Общей глубинной точки, Изд-во ВСЕГЕИ, СПб. 2014. – 119 с.
- 17) Гриценко С.А., Егорова Н.В. К вопросу о сейсмостратиграфии, мультифокусировании и интерполяции сейсмических разрезов (математический обзор) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. - Т.13. - №2
- 18) Голубев В.А. Геотермия Байкала, Издательство «Наука» Сибирское отделение, Новосибирск. 1982. – 136 с.
- 19) Гольмшток А.Я. От черного моря до Байкала: О сейсмических исследованиях Л.П. Зоненшайна на озере Байкал // Лев Павлович Зоненшайт: Очерки. Воспоминания / Ран; Отв. Ред.: Хаин В.Е., Московский А.А.; Сост. Филиппова И.Б. - М.: Наука, 1995. - С. 172-174, 180-181.
- 20) Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газовых гидратов // Геология и геофизика. 1997, № 10. - С. 1677-1691.
- 21) Давыдов А.В. Вейвлетные преобразования сигналов. 2008. – 17 с.
- 22) Домбровская Ж.В., Аргельянц М.М., Волков В.Н. О радиологическом возрасте эпигенетически серицитизированных и алунитизированных измененных пород байкальской серии Прибайкалья // Полезные ископаемые, 1984, № 3. - С. 46—58.
- 23) Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2003, т. XLVII, № 3, - С. 91-100.
- 24) Дядин Ю.А., Гущин А.Л. Газовые гидраты// Соросовский образовательный журн. 1998, № 3. - С. 55-64.
- 25) Истомин В.Е., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермический метод обнаружения газовых гидратов в донных осадках акваторий// Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 7, - С. 920-929.
- 26) Замараев С.М., Адаменко О.М., Резанов Г.Ф., Кульчицкий А.А., Адаменко Р.С., Викентьева Н.М. Структура и история развития Предбайкальского предгорного прогиба. М., Наука, 1976, 134 с.

- 27) Зоненшайн Л.П. Тектоника литосферных плит территории СССР/ Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов А.М. – М. : Недра, 1990. – Кн. 2. – 334 с.
- 28) Зоненшайн Л.П., Гольмшток А.Я., Хатчинсон Д. Структура Байкальского Рифта// Геотектоника. 1992. № 5. 1992. – 63-75 с.
- 29) Зоненшайн Л.П., Казьмин В.Г., Кузьмин М.И. Новые данные по истории Байкала: результаты наблюдений с подводных обитаемых аппаратов // Геотектоника. 1995. № 3. - С. 46-58.
- 30) Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (7). - С. 685-699.
- 31) Калинин В.В., Милановский В.Е. Строение осадочного чехла озера Байкал // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1985. Т. 60. Вып. 2. - С. 48-58.
- 32) Казьмин В.Г., Гольмшток А.Я., Клитгорд К.Д. Строение и развитие района Академического хребта по данным сейсмических и подводных исследований (Байкальский рифт) // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 10, - С. 164-176.
- 33) Кирьянова Т.Н., Кирзелёва О.Я., Копенкин Р.Ю., Кляжников Д. В., Бронскова Е.И. Методика выделения палеорусел в тюменской свите с использованием технологии спектральной декомпозиции 7th Saint Petersburg International Conference & Exhibition – Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences Saint Petersburg, Russia, 2016.
- 34) Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3-32.
- 35) Крылов С.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Изучение байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах // Геофизика, Доклады Академии Наук, 1995, том 345, № 5. - С 674 – 677 с.
- 36) Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Дучков А.Д., Гелетий В.Ф., Гольмшток А.Я., Карабинов Е.Б., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Иошида Н., Бажин Н.М., Дядин Ю.А., Ларионов Э.Г., Манаков А.Ю., Мандельбаум М.М., Ващенко И.Ф. Гидраты метана в осадках озера Байкал // Геология рудных месторождений, 2000, том 42, № 1, - С 25-37.
- 37) Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф.,

- Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Э.П. Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты// Геология и геофизика. – 2001. № 1-2. - С. 8—34.
- 38) Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. - 247 с.
- 39) Леви К. Г., Бабушкин С. М., Бадардинов А. А. и др. Активная тектоника Байкала / Леви К. Г., Бабушкин С. М., Бадардинов А. А., Буддо В. Ю., Ларкин Г. В., Мирошниченко А. И., Саньков В. А., Ружич В. В., Вонг Х. К., Дельво Д., Колман С. // Геология и геофизика. - 1995. - Т. 36, № 10. - С. 154-163.
- 40) Логачев Н.А. Саяно-Байкальское Становое нагорье // Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1974. - С. 16-162.
- 41) Логачев Н.А., Брандт Л.С., Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт С.В., Конев А.А., Пясова А. М. К-Аг датирование палеоценовой коры выветривания в Байкальском регионе // Докл. РАН, 2002, т. 385, № 6- С. 648-650.
- 42) Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (5), с. 391-406.
- 43) Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. – М.: Недра, 1985, 232 с.
- 44) Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. - 252 с.
- 45) Мац В.Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 9, - С. 1219—1244
- 46) Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) - четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. - С. 467-489.
- 47) Машук И.М., Акулов Н.И. Олигоценные отложения Байкальской рифтовой впадины // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 4, с. 461—475.
- 48) Николаев Н.И. Закономерности тектонических движений и осадконакопления в позднем кайнозое // Доклады 27-й сессии МГК. М., Наука, 1984, Т. 3, с. 22—32.
- 49) Павлов С.Ф., Кашик С.А., Ломоносова Т.К., Климанова В.М. Кайнозойские коры выветривания и осадочные формации Западного Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1976. - 160 с.

- 50) Парфенов Л.М., Булгатов А.Н., Гордиенко И.В. Террейны и формирование орогенных поясов Забайкалья // Тихоокеанская геология, 1996, т. 15, № 4. - С. 3-15.
- 51) Рассказов С.В., Лямина Н.А., Лузина И.В., Черняева Г.П., Чувашова И.С., Усольцева М.В. Отложения Танхойского третичного поля, Южнобайкальская впадина: стратиграфия, корреляция и структурные перестройки в Байкальском регионе // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. – С. 993-1032.
- 52) Северо-Байкальский вулcano-плутонический пояс: возраст, длительность формирования и тектоническое положение / А. М. Ларин (и др.) // Докл. АН. – 2003. – Т. 392, № 4. – С. 506-511.
- 53) Слюдянский кристаллический комплекс. – Новосибирск : Наука, 1981. – 196 с.
- 54) Суворов В.Д., Мишенькина З.Р. Структура осадочных отложений и фундамента под южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // Геология и геофизика, 2005, т. 46, № 11. – С. 1159-1167.
- 55) Уфимцев Г.Ф. Морфоструктурное значение листрических сбросов в Байкальском рифте // Геотектоника. 1993. № 6. – С. 88-93.
- 56) Хавкин А.Я., Табакаева Л.С. Инновационная технология разработки месторождений газовых гидратов. М.: ПЦ «НТИС», Спутник. 2008.
- 57) Хатчинсон Д., Гольмшток А.Я., Зоненшайн Л.П., Мур Т.К., Шольц К.А., Клитгорд К.Д. Особенности строения осадочных толщ оз. Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки (1989 г.) // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (10—11). – С. 25-36.
- 58) Хаин В.Е., Михайлов А.Е. Общая геотектоника. М.: Недра, 1985. - 326 с.
- 59) Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в осадках озера Байкал // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 6. – С. 979-981.
- 60) Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В. Газогидратные скопления в донных осадках озера Байкал// Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. №2 (39), 2011. – С. 247 – 252.
- 61) Эволюция Земли в летописи Байкала / А. А. Бухаров // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 88–101.
- 62) Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования / А.Н. Яковлев. – Новосибирск. – изд. НГТУ. – 2003. – 104 с.

- 63) Agena W.F., Lee M.W., Miller J.J., Hutchinson R.D. Lake Baikal – 1992 Processing of Multichannel Seismic Reflection Data U.S. Geological Survey Open-File Report 94-263, 1992, p. 45.
- 64) Brink U.S., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting. Massachusetts, USA // *Journal of geophysical research*, v. 107, no. B7; p. 2-15. 2002.
- 65) Buslov M.M. Geodynamic nature of the Baikal Rift Zone and its sedimentary filling in the Cretaceous-Cenozoic: the effect of the far-range impact of the Mongolo-Okhotsk and Indo-Eurasian collisions. *Russian Geology and Geophysics* 53 (9), p. 955-962, 2012.
- 66) Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II. Cenozoic rifting // *Tectonophysics*, 1997, v. 282, p. 1-38.
- 67) Gao S.S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Zorin Yu.A., Logachev N.A., Kogan M.G., Burkholder P.D., Meyer R.P. Asymmetric upwarp of the asthenosphere beneath the Baikal Rift zone, Siberia // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, № 15, p. 315-330.
- 68) Gao S.S., Liu K.H., Davis P.M., Slack P.D., Zorin Yu.A., Mordvinova V.V., Rozhevnikov V.M. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal Rift zone // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, № B4, p. 5-12.
- 69) Gelchinsky B., Berkovitch A., and Keydar S., 1999, Multifocusing Homeomorphic Imaging, Part 1: Basic concepts and formulae: *Journal of Applied Geophysics*, v. 42/3-4, p. 229-242. Part 2. Multifold data set and Multifocusing: *Journal of Applied Geophysics*, 42, p. 243–260.
- 70) Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R., Khanukaev S.B. Heat flow and gas hydrates of the Baikal Rift zone. // *Int. J. Earth Sci.*; 2000; 89(2): 193-211.
- 71) Guo H., Lewis S., Marfurt J.K. Mapping multiple attributes to three- and four-component color models – A tutorial // *Geophysics*. 2008, v. 73. N 3.
- 72) Hutchinson R.D., Golmshtok A.J., Scholz C.A. et al. Bottom simulating reflector in Lake Baikal // *EOS*, 1991, v. 72, p. 307. p. W7–W19.
- 73) Hutchinson D.R. Navigation quality from lake Baikal 1992 multichannel seismics cruise Open-File Report #95-233, U.S. Geological Survey; p. 165; 1995.
- 74) Jäger R., Mann J., Hocht G., and Hubral P., 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes: *Geophysics*, 66, p. 97–109.
- 75) King L.C. *The morphology of the Earth: a study and synthesis of world scenery*. Edinburgh, Oliver&Boyd, 1967, 699 p.

- 76) Kiselev A.I., Volcanism of the Baikal rift zone, *Tectonophysics*, 143, 235 – 244, 1987.
- 77) Kuzmin M. I., Karabanov E. B., Prokopenko A. A., Gelety V. F., Antipin V. S., Williams D. F., Gvozdkov A. N., 2000. Sedimentation processes and new age constraints on rifting stages in Lake Baikal: results of deep-water drilling // *International Journal of Earth Sciences*, v. 89, No. 2, p. 183–192.
- 78) Lee M.W., Agena W.F., Hutchinson D.R., 1996. Amplitude blanking in seismic profiles from Lake Baikal // *Marine and Petroleum Geology*, v. 13, No. 5, p. 549-563.
- 79) Mashchuk I.M., Akulov N.I., 2012. Oligocene deposits of the Baikal rift valley. *Geology and Geophysics* 53 (4), p. 356-366.
- 80) Mats V.D., 1993. The structure and development of the Baikal rift depression. *Earth-Science Reviews* 34 (2), p. 81-118.
- 81) Mats V.D., Perepelova T.I., 2011. A new perspective on evolution of the Baikal Rift // *Geoscience Frontiers* 2(3), p. 349-365.
- 82) Mats V.D., 2012. The sedimentary fill of the Baikal Basin: Implications for rifting age and geodynamics // *Geology and Geophysics* 53 (9), p. 936-954.
- 83) Mats V.D., 2013. Late cretaceous and cenozoic stratigraphy of the Baikal Rift sediments. *Stratigraphy and Geological Correlation* 21 (6), p. 637-651.
- 84) Moor T.C., Klitgord K.D., Golmshtok A.J., Weber E Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy. *GSA Bulletin*; 1997; v. 109; no. 6; p. 746-766.
- 85) Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // *Science*, 1975, v. 189, № 4201, p. 419-425.
- 86) Nichols D., Miller G., Akentiev A. U.S. Geological Survey Open File Report OF- p. 92-693, 1992.
- 87) Nikolaev V.G., Vanyakin L.A., Kalinin V.V., Milanovskii V.E., 1985. The structure of the sedimentary cover of Lake Baikal. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological section* 60 (2), p. 48-58.
- 88) Partyka G.A., Gridley J.M., Lopez, J. 1999, Interpretational Applications of Spectral Decomposition in Reservoir Characterization, *The Leading Edge*, vol. 18, No. 3, p. 353-360.
- 89) Taner M.T., Koehler F., 1969, Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity function. *Geophysics*, v. 34, p. 859-81.
- 90) Tiberi C., Deschamps A., Déverchère J., Petit C., Perrot J., Appriou D., Mordvinova V., Dugaarma T., Ulzibaat M., Artemiev A. Asthenospheric imprints on the lithosphere in

Central Mongolia and southern Siberia from a joint inversion of gravity and seismology (MOBAL experiment) // Geophys. J. Intern., 2008, v. 175, p. 1283-1297.

91) Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics, 2003, v. 371, p. 153-173.

92) Интернет-ресурс:

<http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/66738/%D0%91%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D0%B0%D0%BB>

93) Интернет-ресурс: <http://gritsenko1.ucoz.ru>