

**ОСОБЕННОСТИ ФЛЮИДНОГО РЕЖИМА ЛИТОСФЕРЫ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ
ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ И ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ДАННЫХ**

***В.М. Никифоров, Р.Г. Кулинич, М.Г. Валитов, И.В. Дмитриев,
С.С. Старжинский, Г.Н. Шкабарня***

*ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская
43, г. Владивосток, 690041; e-mail: nikiforovv@mail.ru*

Поступила в редакцию 21 марта 2012 г.

В работе приводятся новые данные о флюидном режиме литосферы в зоне сочленения континента с окраинными морями. Впервые, для решения такой задачи, использована комплексная интерпретация геофизических методов: магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования, включая уникальные исследования вариаций электрического поля на подводном телекоммуникационном кабеле JASC (Japan Sea Cable); структурно-плотностного моделирования; термометрии и термодинамики. Совместный анализ распределения в литосфере электропроводности, плотности и температуры позволил обосновать участие мантийных флюидов в формировании структурно-вещественных комплексов, существенно отличающихся под континентом и окраинным Японским морем.

Ключевые слова: флюидный режим, гидратация, магнитотеллурические зондирования, геоэлектрический разрез, структурно-плотностное моделирование, JASC, Японское море.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время зона сочленения южного Сихотэ-Алиня с котловиной Японского моря активно изучалась геофизическими методами с различной глубинной информативностью. Структурно-плотностные характеристики земной коры этой зоны достаточно детально исследованы методами наземной, морской и спутниковой гравиметрии с опорой на результаты сейсмических исследований. В результате определены районы с различными типами коры и выявлена зона структурно-вещественной трансформации континентальной коры при переходе в область глубоководной Япономорской котловины [1, 2, 7–10].

В этом же районе выполнены магнитотеллурические исследования, позволившие существенно повысить глубинность получаемой информации. Указанными исследованиями также установлена резкая перестройка электропроводящей структуры литосферы и более глубоких горизонтов тектоносферы [13, 15].

На базе накопленных данных появилась возможность построения увязанной структурно-веще-

ственной и флюидодинамической модели рассматриваемой зоны.

В настоящей работе приводятся результаты анализа уникальных данных многолетних наблюдений вариаций электромагнитного поля с применением подводного телекоммуникационного кабеля связи JASC (Japan Sea Cable), магнитотеллурических (МТЗ) и магнитовариационных (МВЗ) зондирований в южной части Приморья в комплексе с данными наземной, морской и спутниковой гравиметрии и термометрии в зоне сочленения континента с Центральной котловиной Японского моря.

**ГЛУБИННОЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ**

Исходными данными для построения геоэлектрического разреза являются записи вариаций естественного электромагнитного поля Земли, полученные на подводном кабеле JASC, длиной около 750 км, на отдельных отрезках континентальных кабелей связи, длиной до 30 км, на взаимно-перпендикулярных измерительных линиях, длиной до 2 км в

пунктах магнитотеллурических зондирований, на трехкомпонентных магнитометрах, установленных на обсерваториях Японии, Приморья (рис. 1). Уникальность системы наблюдения вариаций электрического поля состоит в том, что предоставлен редкий случай получения базовой, хотя весьма усредненной, геоэлектрической модели региона. Это возможно потому, что большая длина кабеля JASC делает записи вариаций электрического напряжения свободными от локальных искажений, а его расположение в изотропной морской воде благоприятствует правильной оценке амплитуд вариаций во всем диапазоне, что не удастся сделать на суше из-за влияния приповерхностных неоднородностей удельного электрического сопротивления.

Численное моделирование геоэлектрического разреза тектоносферы с использованием кабельных

данных проводилось неоднократно по мере пополнения банка данных [3, 6, 13]. В работе [19] приводятся результаты 2D интерпретации амплитудных и фазовых кривых, рассчитанных по 6-летнему ряду непрерывных записей вариаций и частотным зависимостям магнитного типпера в трех береговых пунктах наблюдения. Оценка искажений, возникающих в кабеле JASC за счет переменной толщины перекрывающего водного слоя, показала, что на периодах менее 100 с они могут быть значительными. При построении модели не было необходимости учитывать локальные структуры тектоносферы. Для двумерного численного моделирования использовалась программа Ваннмейкера [21]. Подбором различных геометрических и электрических параметров исходной модели достигалось наилучшее совпадение модельных и экспериментальных кривых (рис. 2 а).

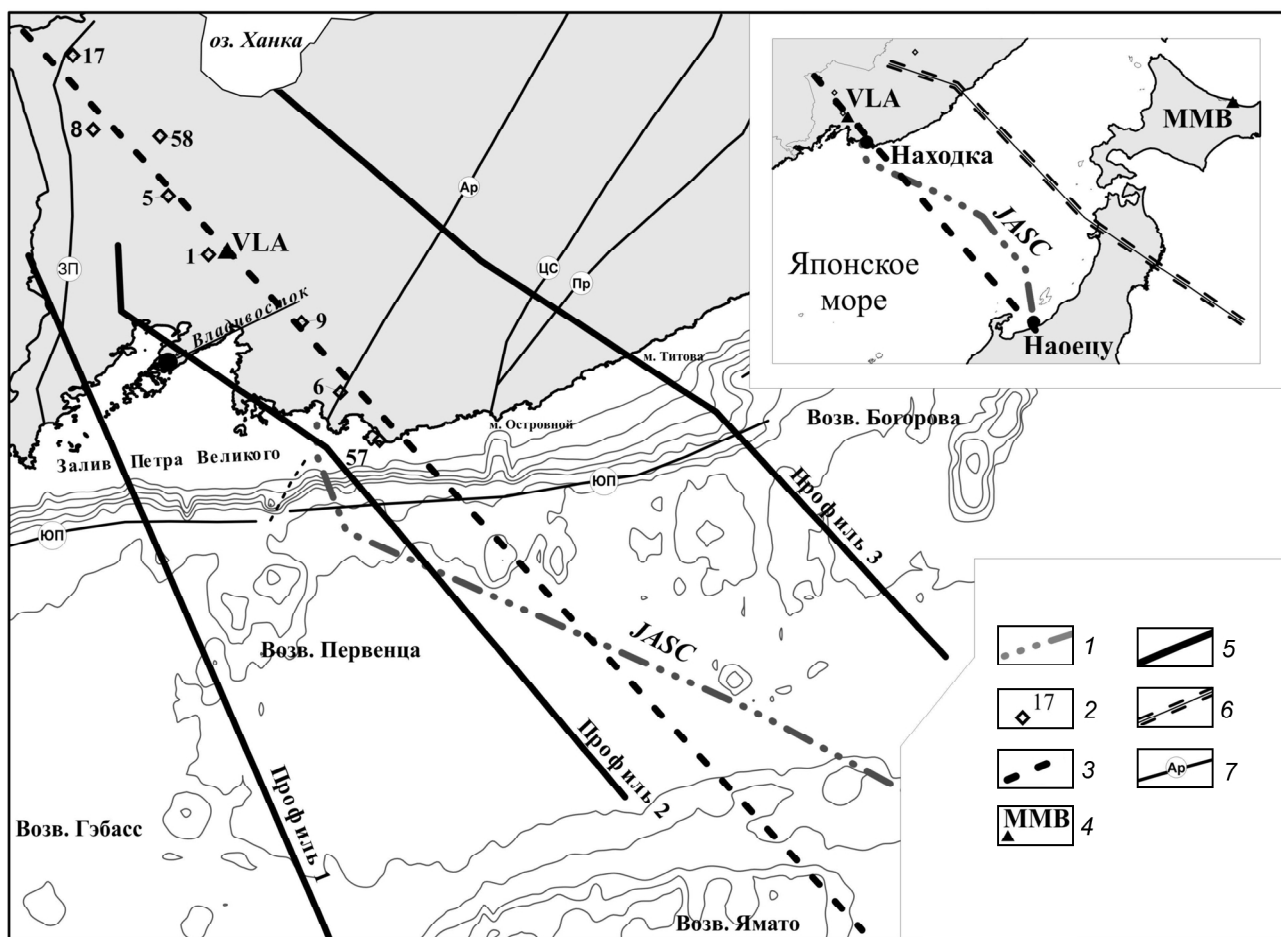


Рис. 1. Схема геофизических исследований

1 – положение подводного телекоммуникационного кабеля JASC; 2 – пункты магнитотеллурических зондирований на суше; 3 – линия профиля геоэлектрического разреза; 4 – местоположение магнитных обсерваторий Владивосток (VLA) и Мемомбецу (MMB); 5 – линии профилей структурно-плотностного моделирования; 6 – профиль глубинного температурного разреза; 7 – основные разломы: Западно-Приморский (ЗП), Арсеньевский (Ар), Центрально-Сихотэ-Алинский (ЦС), Прибрежный (Пр), Южно-Приморский (ЮП).

Окончательная модель, полученная в результате подбора, показана на рис. 2 б.

Самая нижняя часть разреза представлена проводящими блоками с удельными сопротивлениями 0.1, 0.2 и 3 Ом·м, кровли которых наклонно погружаются под континент до глубины 560 км. На глубинах 100–200 км слои с удельными сопротивлениями 4, 5 и 30 Ом·м прерываются наклонно погружающимся под континент слоем с удельным сопротивлением 600 Ом·м. Аналогичный слой, ассоциированный с сейсмофокальной зоной и погружающейся плитой, ранее был выявлен в Охотоморском регионе [14]. Изменение удельного сопротивления этого слоя до 1500 Ом·м не ухудшает качества аппроксимации. Верхняя часть геоэлектрического разреза тектоносферы, соответствующая литосферному слою, неоднородна для различных отрезков профиля. На континенте она представлена высокоомным слоем с удельным сопротивлением 1000 Ом·м, подстилаемым относительно низкоомными слоями 100 Ом·м и

300 Ом·м. Под дном Японского моря верхний высокоомный слой отсутствует, и литосфера на всю свою мощность характеризуется удельным сопротивлением менее 300 Ом·м. В ней расположено низкоомное включение в виде пласта, кровля которого в процессе варьирования параметрами модели устойчиво сохраняется на глубине 10 км. Западная граница пласта и его подошва могут менять свое положение в широких пределах. Диапазон возможных значений удельного электрического сопротивления также широк, но ограничен верхним пределом 10 Ом·м. Под Японией и Тихим океаном литосфера представлена однородным блоком несколько повышенного сопротивления, достигающего 400 Ом·м. Достоверность параметров разреза этой части профиля невелика, так как расположенные здесь геоэлектрические структуры слабо влияют на ток в кабеле JASC.

Численное моделирование кабельных данных совместно с магнитными типперами (отношение вертикальной компоненты магнитного поля к горизонтальной в частотной области) [20] в трех береговых пунктах позволило не только выделить континентальный, окраинноморский и Тихоокеанский литосферные блоки, но и определить ряд тех элементов геоэлектрического разреза, которые невозможно изменить без нарушения согласованности между расчетом и экспериментом. Прежде всего, это наличие в разрезе дна Японского моря низкоомного слоя с удельным сопротивлением 4 Ом·м, кровля которого погружается от 100 км в центре до 150 км у берега Приморья и далее неизменно протягивается в континентальной части профиля. Этот слой обычно отождествляется с астеносферой.

На рассмотренный слой удобно редуцировать кривые кажущегося сопротивления, полученные в пунктах МТЗ, выполненных на территории юга Приморья, где их истинный уровень неизвестен из-за искажающего влияния приповерхностных неоднородностей удельного сопротивления. Кроме того, знание порядков удельных сопротивлений подкоровой литосферы и земной коры сокращает пределы неоднозначности интерпретации данных МТЗ в континентальной части, прилегающей к Японскому морю.

Уточненная таким образом геоэлектрическая модель литосферы в зоне сочленения континента и окраинного моря показана на рис. 3. Вместе с тем, обнаружены анизотропно-проводящие комплексы пород, расположенные в нижней и средней частях земной коры континента. Особенность этих комплексов заключается в том, что в одном из направлений, в данном случае в субмеридиональном, электрическое сопротивление отличается низким уровнем значений 20–50 Ом·м, а в ортогональном к нему направлении

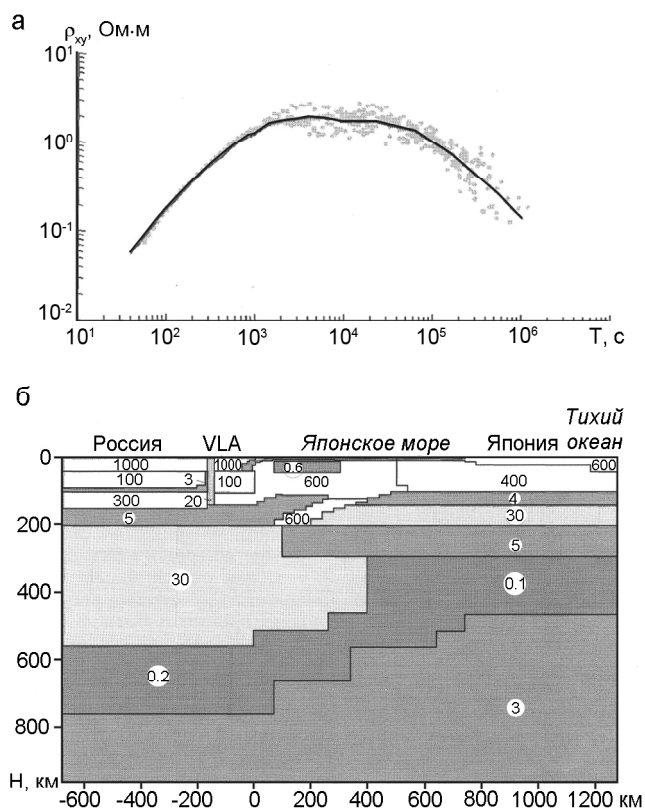


Рис. 2. Геоэлектрический разрез тектоносферы Японского региона.

а) сопоставление кажущегося сопротивления, полученного по результатам измерений на кабеле JASC и результатам 2D моделирования; б) двумерный модельный геоэлектрический разрез (отсчет километража производится от береговой линии в г. Находка).

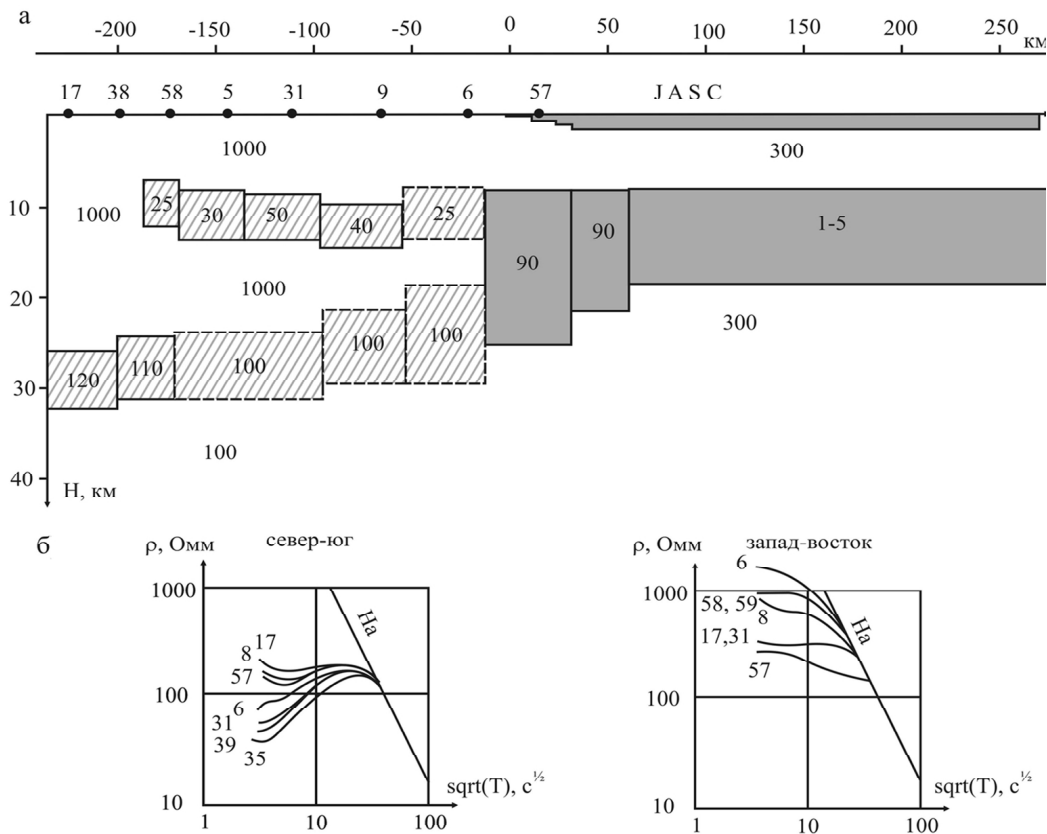


Рис. 3. Геоэлектрическая модель земной коры.

а) геоэлектрический разрез по профилю точек МТЗ 17-57-кабель JASC (темным цветом обозначены блоки изотропной проводимости, штриховкой – блоки анизотропной проводимости, пунктирная линия – неуверенные границы); б) кривые кажущегося сопротивления, редуцированные к линии H_a (кровле астеносферы, закрепленной по региональной модели с использованием результатов интерпретации по кабелю JASC).

оно возрастает до фонового уровня 1000 Ом·м. По мере приближения к береговой линии оба анизотропных комплекса объединяются в один, при этом уровень сопротивления в направлении максимальной проводимости понижается до 10–20 Ом·м. Береговые данные МТЗ допускают отождествление низкоомного слоя, развитого в земной коре Японского моря на глубине 10 км, с анизотропным комплексом, рассмотренным выше.

СТРУКТУРНО-ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ С ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОТЛОВИНОЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИИ

Структурно-плотностное моделирование коры в указанном районе выполнено вдоль нескольких профилей, его результаты освещены в работах [1, 2]. Основные методические приемы этого процесса включили в себя следующее. Исходный структурный каркас обеспечивался геологическими и сейсмическими данными. Для определения начальных плотностных

характеристик указанного каркаса использовались результаты петрофизических исследований, выполненных как под акваторией Японского моря, так и на прилегающем континенте [18]. По результатам сопоставления плотности всех типов пород, развитых в наземной части исследуемого района, составлен сводный литолого-плотностной ряд, представленный на рис. 4 и использованный для моделирования верхних горизонтов коры.

Для оценки плотности глубинных слоев земной коры, недоступных для прямого исследования, как в наземной, так и в морской части района исследований рассчитана зависимость “плотность–скорость”, в основе которой лежат первичные данные о скоростях, полученных в Японском море и Приморском крае. Результаты представлены на рис. 5.

Гравитационное 2-D моделирование производилось с использованием программ, разработанных в лаборатории гравиметрии ТОИ ДВО РАН [5] по методике, описанной в [1]. В данной работе используется одна из нескольких моделей, оптимально отража-

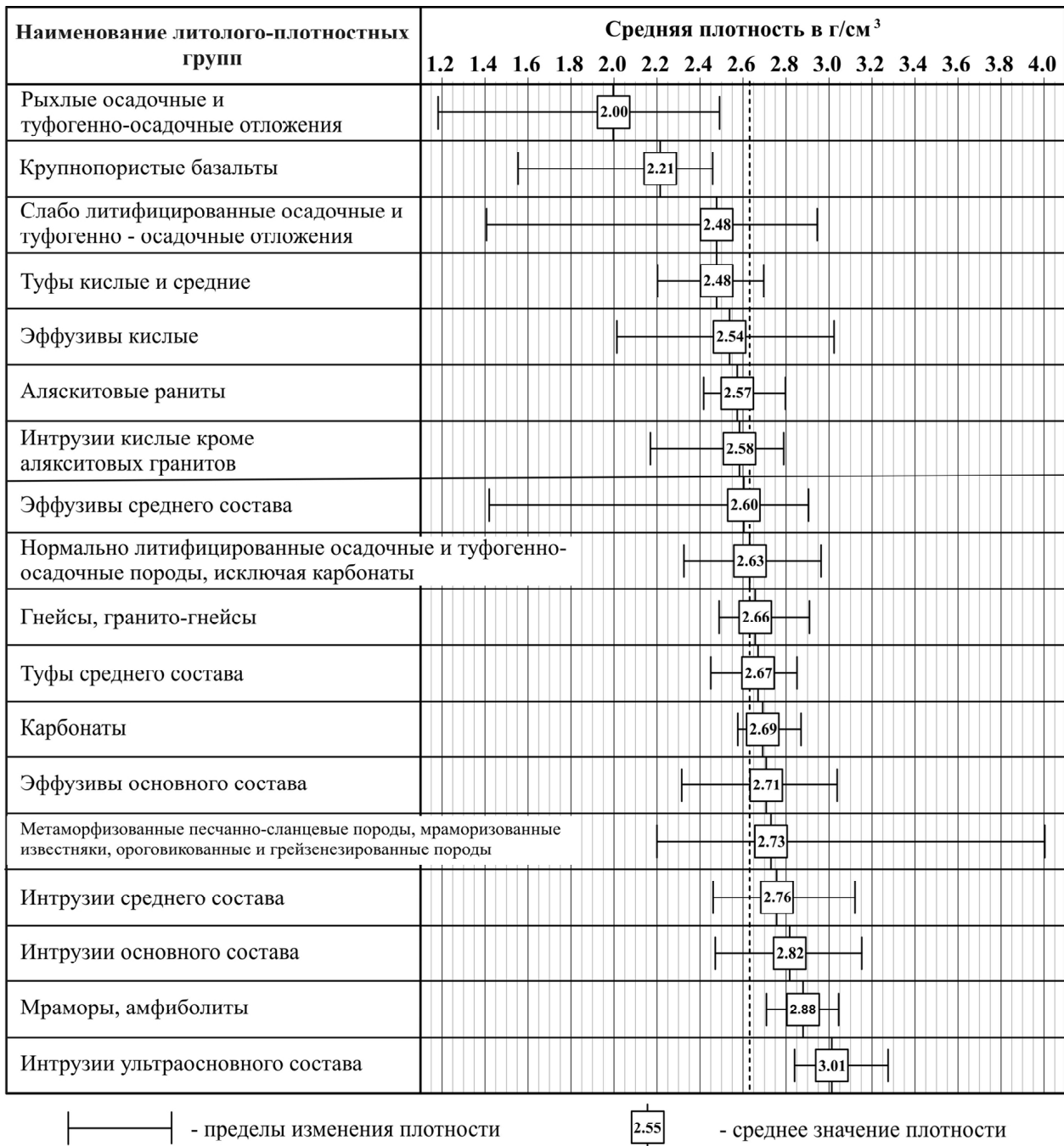


Рис. 4. Сводный литолого-плотностной ряд горных пород и осадочных отложений южной части Приморья

Пунктирной линией обозначен средний плотностной уровень литолого-плотностного ряда, относительно которого породы, расположенные слева и справа, являются соответственно источниками отрицательных и положительных гравитационных аномалий.

ющая общую структурно-вещественную ситуацию переходной зоны континент–Японское море и наиболее близко расположенная к кабелю JASC (рис. 6).

В соответствии с представленной моделью [2] мощность коры континентальной части профиля изменяется от 32 км в его северо-западной оконечности

до 30 км под внешней кромкой шельфа. Общее сокращение мощности коры связано с поднятием поверхности Мохо и замещением “базальтового” слоя мантийным субстратом. Глубина залегания его кровли остается относительно постоянной и составляет 14–15 км. В надбазальтовой составляющей земной

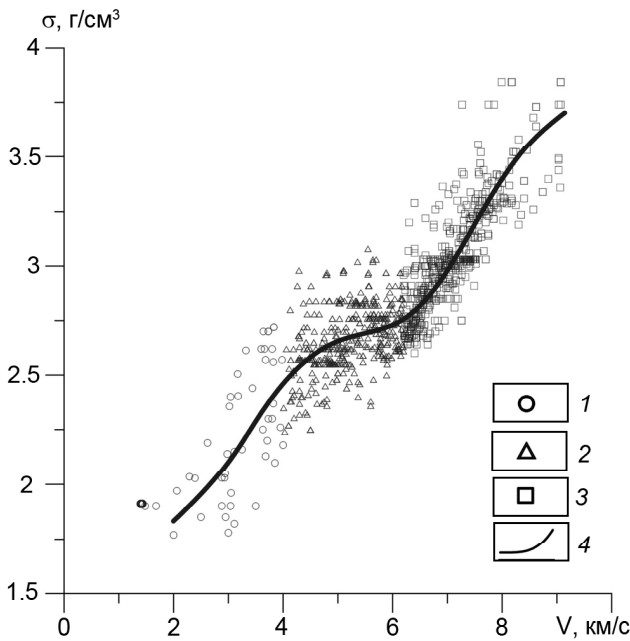


Рис. 5. Зависимость “плотность–скорость продольных волн” для исследуемого района.

1 – в интрузивных и метаморфических породах, 2 – в вулканогенно-осадочных породах, 3 – в осадочных образованиях, 4 – линия тренда.

коры выделяется кристаллический фундамент, верхнепалеозойский вулканогенно-осадочный складчатый комплекс, мезокайнозойский осадочный чехол и интрузивные образования различного возраста и состава. Фундамент предположительно сложен раннепалеозойскими метаморфическими комплексами мощностью от 8 до 13 км с плотностью 2.7–2.8 г/см³. Почти повсеместно фундамент перекрыт мощным верхнепалеозойским вулканогенно-осадочным складчатым комплексом (2.63–2.7 г/см³), на котором залегают осадочные и вулканогенные отложения мезозоя и кайнозоя (2.55–2.63 г/см³). Среди магматогенных образований на профиле выделены как кислые, так и базитовые разности.

В пределах континентального склона происходит полное выклинивание верхней сиалической части земной коры, значительное сокращение “базальтового” слоя с 17 км до 9 км и подъем поверхности Мохо с 30 км до 15 км.

Разрез земной коры Центральной котловины имеет простое трехслойное строение, стандартное для всех глубоководных котловин. Он представлен тремя слоями: осадочным с мощностью 1.5–2.0 км и плотностью 2.0–2.3 г/см³, “переходным” с мощностью 1.5–3.0 км и плотностью 2.45–2.70 г/см³, “базальтовым” с мощностью 6.0–8.5 км и плотностью

2.85–3.05 г/см³. Общая мощность земной коры составляет 9.5–11 км.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Исходя из того, что представленная выше плотностная модель обоснованно отражает вещественную структуру земной коры, стоит задача выяснения природы глубинной электропроводности, структура которой в самых общих чертах изучена электромагнитными методами.

Редкая сеть наблюдения МТЗ и интегральный характер построения с использованием кабеля JASC позволяет на данном этапе исследований ставить лишь только самую общую задачу. Поэтому ограничимся рассмотрением модели, представленной “гранитным” и “базальтовым” слоями и верхней мантией (рис. 6).

Сухие горные породы, слагающие отмеченные слои земной коры и верхней мантии, за исключением осадочных образований и водной оболочки окраинного моря, характеризуются удельными электрическими сопротивлениями 10⁴–10⁶ Ом·м [16], что в тысячи раз превосходит полученные нами оценки даже для самых высокоомных блоков земной коры. Как известно, сопротивление горных пород в геологическом разрезе мало зависит от их минерального состава, а определяется свойствами емкостного пространства (дефектами сплошности) и водонасыщенностью, в связи с чем электропроводность большинства пород является ионной. Высокому уровню проводимости пород способствует наличие в них носителей тока, в качестве которых могут выступать рассолы или графит.

Особенность построенной нами геоэлектрической модели заключается в том, что фоновое сопротивление подкоровой литосферы (100–300 Ом·м) ниже, чем фоновое сопротивление континентальной земной коры, равное 1000 Ом·м. Это указывает на то, что насыщение разреза носителя электрического тока происходит в направлении от глубоких слоев верхней мантии к дневной поверхности. Согласно современным представлениям, планета Земля – это открытая самоорганизующаяся система, сформированная преимущественно за счет эндогенных процессов, обусловленных действием источников, расположенных внутри нее, среди которых ведущее место занимают глубинные газы [11]. Продукты глубинной дегазации объединяются под общим названием “флюид”. Главными компонентами глубинного флюида считаются газы: H₂, CO₂, CO, CH₄, H₂O [4, 11]. В зависимости от их количественного соотношения,

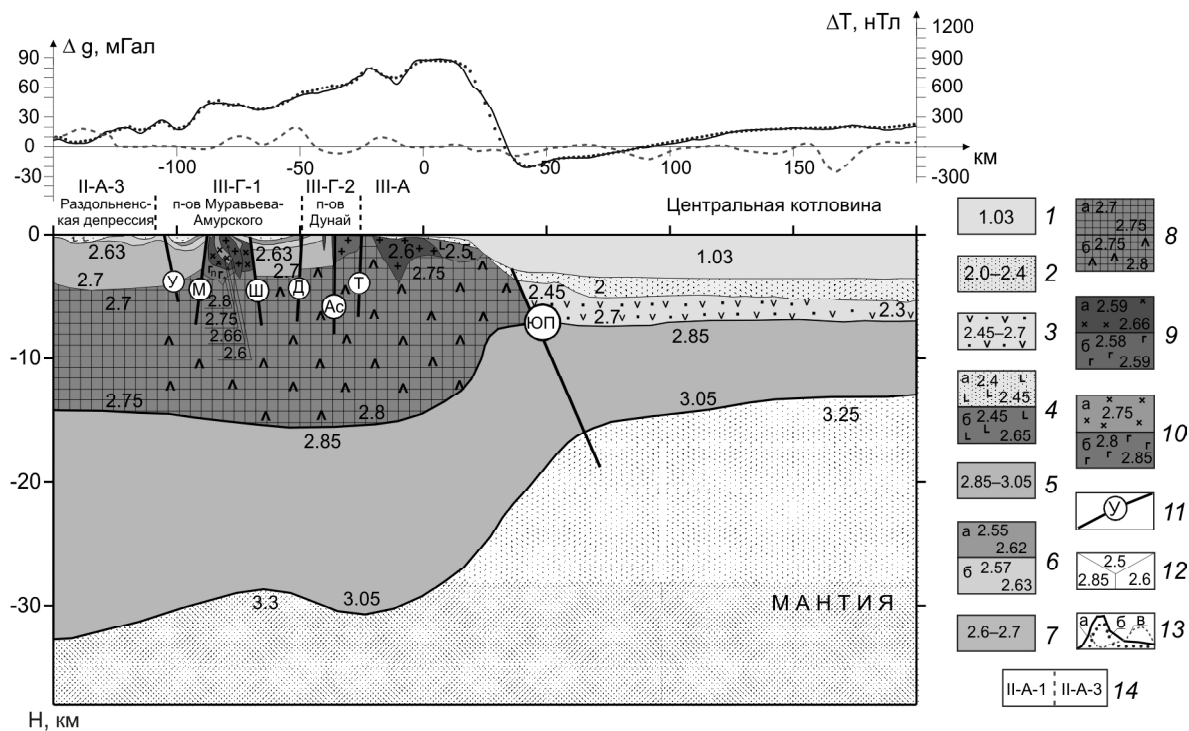
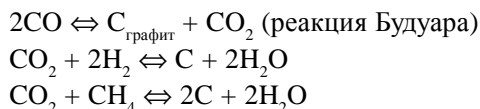


Рис. 6. Структурно-плотностная модель земной коры по Профилю 2.

1 – водная толща; 2 – осадочный слой; 3 – вулканогенно-осадочный (“переходный”) слой; 4 – базальты: а) кайнозойские, б) мезозойские; 5 – “базальтовый” слой; 6 – мезозойские осадочно-вулканогенные образования: а) меловые, б) триасовые; 7 – палеозойские складчатые осадочно-вулканогенные образования; 8 – кристаллический фундамент: а) сиалический, б) метабазитовый; 9 – интрузии гранитного состава: а) мезозойские, б) палеозойские; 10 – интрузии среднего (а), основного и ультраосновного (б) состава; 11 – разломы: Уссурийский (У), Муравьевский (М), Шкотовский (Ш), Дунайский (Д), Аскольдовский (Ас), Южно-Приморский (ЮП), Тинканский (Т); 12 – плотности геологических тел; 13 – гравитационное поле: а) наблюдаемое (условный уровень), б) расчетное, в) магнитное поле; 14 – границы СФЗ по (Бажанов и др., 1989).

температуры, давления, свойств вмещающих пород и т.д. происходит трансформация флюида и изменение вмещающей среды. Формирование электропроводящей структуры разреза определяют химические реакции, сопровождающиеся образованием графита и воды. Обычно рассматриваются [11, 17] три таких реакции:



При температурах ниже 700°C реакция Будуара протекает с образованием графита и углекислого газа. Термодинамические условия образования воды и графита показаны на рис. 7.

Для того чтобы определить, в какой части изученной нами структурно-вещественной модели могут накапливаться носители электрического тока, проведем оценку термодинамических условий. Согласно данным [15], температура в земной коре района достигает 600 °С. Температурный разрез, совмещенный со структурно-вещественным разрезом, по-

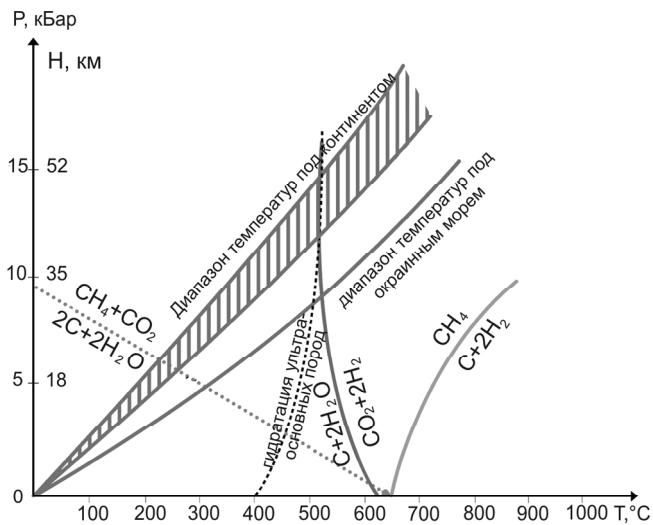


Рис. 7. Соотношение геотерм в литосфере с линиями равновесия компонент флюида и начала гидратации основных пород.

казан на рис. 8. Согласно температурному разрезу, поверхность начала образования графита в ходе реакции Будуара располагается на глубине около 50 км под континентом и поднимается до 20–25 км под Центральной котловиной Японского моря. Насыщение верхнемантийного вещества графитом способствует снижению электрического сопротивления от 10^6 Ом·м, характерного для “чистого” перидотита в этих РТ-условиях, до 100–300 Ом·м, наблюдаемых в реальности.

Граница, выше которой образуется вода и графит за счет реакции углекислого газа с водородом, располагается на глубине порядка 35 км под континентом и поднимается до 18 км под Центральной впадиной Японского моря. В континентальной части профиля она располагается на 2–7 км ниже, относительно подошвы “базальтового” слоя, а в окраинно-морской части практически совпадает с ней. Фронт гидратации основных пород (поверхность, выше которой вода переходит в связанное состояние, меняя минералогический состав вмещающих пород) под континентом совпадает с границей начала образова-

ния воды [12]. Это означает, что вода будет расходоваться на гидратацию (серпентинизацию), образуя вблизи подошвы “базальтового” слоя слабопроницаемый для воды экран. Процесс образования экрана сопровождается накоплением графита, который осаждается вдоль трещин, придавая породам анизотропную электрическую проводимость. На геоэлектрическом разрезе (рис. 3) в данном интервале глубин действительно зафиксированы анизотропно-проводящие образования. Аналогичные образования зафиксированы в основании земной коры практически на всей территории Сихотэ-Алинской складчатой области, вдоль разломной системы Тан-Лу, под Сахалином. Конфигурация границ аномальных анизотропно-проводящих зон, как правило, согласуется с плановым положением крупнейших разломов региона.

Поверхность начала гидратации основных пород под Центральной котловиной располагается на 5–6 км выше подошвы “базальтового” слоя. Такое положение допускает присутствие несвязанной воды в габбро-норитовых породах нижней части “базальтового” слоя. Верхняя часть этого слоя гидратирова-

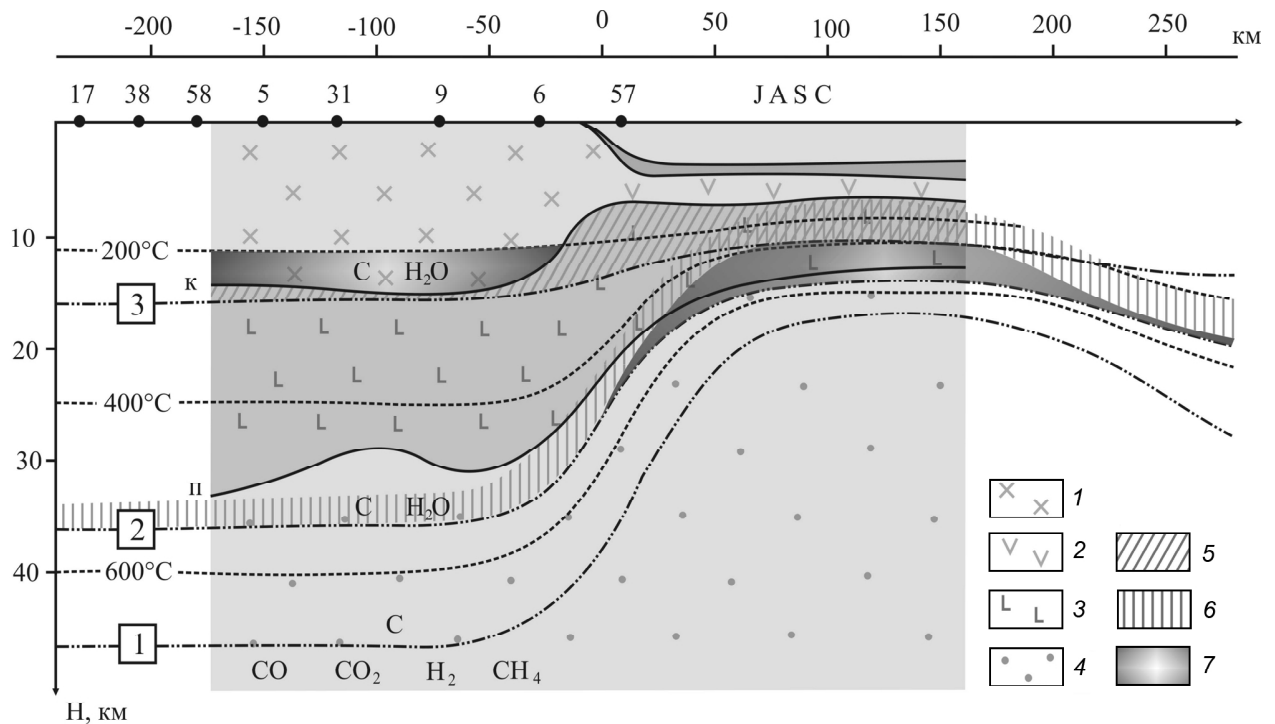


Рис. 8. Структурно-вещественный разрез и термо-флюидодинамика земной коры и верхней мантии в зоне сочленения континента и окраинного моря.

1 – сиалический слой; 2 – вулканогенно-осадочные образования; 3 – базальтовый слой (к – кровля слоя, п – подошва слоя); 4 – верхнемантийные образования; 5 – зоны, допускающие развитие графитизации и гидратации; 6 – зона гидратации основных пород; 7 – зоны, допускающие наличие несвязанной воды. Цифрами в квадратах показаны: 1 – граница возможного накопления углерода по реакции Будуара $2CO \rightleftharpoons 2C + CO_2$ (граница смещения химического равновесия в правую сторону); 2 – граница по реакции $2CO_2 + 2H_2 \rightleftharpoons 2C + 2H_2O$; 3 – граница по реакции $CO_2 + CH_4 \rightleftharpoons 2C + 2H_2O$. На профиль нанесены номера точек МТЗ.

на и обогащена графитом. Таким образом, область “базальтового” слоя, в которой может накапливаться несвязанная вода, оказывается экранированной гидратированным водоупором.

С геоэлектрической точки зрения, и область накопления несвязанной воды, и перекрывающий ее гидратированный экран, насыщенный графитом, придают “базальтовому” слою в пределах Центральной котловины высокую электропроводность, выявленную в результате моделирования данных, полученных с помощью электромагнитных наблюдений на кабеле JASC (рис. 2, 3).

Рассмотренный водонепроницаемый гидратированный экран под континентом препятствует проникновению воды в “базальтовый” слой снизу. Образующиеся в результате очередных циклов тектонической активизации нарушения сплошности гидратированного экрана быстро залечиваются при поступлении новых порций воды. Однако эти нарушения способны пропускать другие компоненты флюида, в частности, углекислый газ и метан. Эти газы в РТ-условиях верхней части земной коры также могут создавать графит и воду. Поверхность, выше которой образуется вода и графит, располагается под континентом на глубине около 15 км вблизи кровли “базальтового” слоя. Возможны случаи образования тонкого гидратированного слоя, трассирующего кровлю “базальтового” слоя. Но чаще всего область образования несвязанной воды располагается в “гранитном” слое выше кровли “базальтового” слоя. В этом случае вся колонна земной коры оказывается проницаемой для ряда глубинных газов, в частности для метана. В восточной, окраинноморской части профиля рассматриваемая поверхность образования воды расположена на глубине 9–10 км и проходит посередине “базальтового” слоя. Следовательно, образующаяся вода расходуется на гидратацию основных пород верхней части слоя. Таким образом, независимо от происхождения воды эта часть “базальтового” слоя гидратирована и обогащена графитом.

В геоэлектрическом отношении особенности вещественного состава земной коры и термодинамические условия способствуют формированию в пределах континента двух глубинных интервалов, в которых при определенных обстоятельствах могут развиваться электропроводящие образования: 10–15 км и 30–40 км. Они расположены вблизи подошвы и кровли “базальтового” слоя. Основная же часть “базальтового” слоя, заполненная, очевидно, безводным флюидом, обладает высоким сопротивлением. Иная ситуация наблюдается под Центральной котловиной. “Базальтовый” слой, залегающий в интервале глубин 8–16 км, оказался в таких РТ-условиях, которые до-

пускают накопление внутри него связанной и несвязанной воды и графита. При этом в верхней части слоя возможно активное развитие процессов серпентинизации.

Весь слой, заполненный водой (рассолами) и графитом, представляется в виде единого низкоомного горизонта. Наличие двух электропроводящих горизонтов под континентом подтверждено данными МТЗ, помимо рассматриваемого профиля, на всей территории Сихотэ-Алинской складчатой области, на Сахалине и в других районах Дальнего Востока. Характерно, что верхний интервал 10–15 км в Сихотэ-Алинской складчатой зоне имеет сопротивление 50–100 Ом·м, а в нефтегазоносной Сахалинской провинции – 10–20 Ом·м. По-видимому, электропроводящие свойства в первом случае обеспечиваются накоплением графита в гидратированной части “базальтового” слоя вблизи его кровли. Во втором случае электропроводность обеспечивается (согласно развитым нами представлениям) водно-графитной смесью, образованной выше кровли “базальтового” слоя. Как отмечалось ранее, расположение области накопления воды выше “базальтового” слоя можно рассматривать как прямое указание на высокую проницаемость всей колонны земной для мантийных газов CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2O .

Следовательно, уровень электрического сопротивления проводящего слоя в интервале глубин 10–15 км может являться поисковым критерием на этапе региональной оценки нефтегазоносности территорий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Комплексный анализ данных глубинных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований совместно с данными гравиметрии и термометрии, впервые проведенный для зоны сочленения Южного Приморья и Японского моря, позволил, несмотря на редкую сеть электрометрических и термических наблюдений, в общих чертах изучить основные особенности флюидодинамического режима недр. Главная особенность заключается в том, что при переходе через границу “суша–море” резко меняется не только структура, вещественный состав земной коры, температура, но и характер переноса летучих компонент глубинной природы. Проходя через земную кору континентального блока, глубинные газы H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2O преобразуют ее различным образом в разных глубинных интервалах. Вблизи границы Мохо возникают условия, благоприятные для гидратации (серпентинизации) вмещающих пород, обогащенных оливином. Образующийся гидратированный слой с повышенным содержанием графита является избирательным экраном для флюидно-

го потока. Он препятствует проникновению H_2O в “базальтовый” слой, но остается прозрачным для других газов: H_2 , CO_2 , CO , CH_4 . Они, достигая кровли “базальтового” слоя, способны образовывать воду новой генерации. Некоторая доля ее расходуется на гидратацию маломощной корки в кровле “базальтового” слоя, но большая доля в несвязанном состоянии накапливается выше этой кровли в низах “гранитного” слоя на глубине 10–15 км. Температура в этом интервале глубин варьирует в пределах 200–300°C, оставаясь ниже критической температуры воды (374°C), поэтому вода находится в жидком состоянии. Перемещаясь по трещинам и разрывам, перегретая вода активизирует гидротермальные и метаморфические процессы, выщелачивание, а также транспортировку материала.

Иной флюидодинамический режим характерен для земной коры глубоководной котловины. Согласно анализу рассмотренных геодинамических данных, несвязанная вода может накапливаться в нижней части “базальтового” слоя в интервале глубин 10–15 км, где температура варьирует в пределах 400–580°C, намного превышая критическую температуру.

Термодинамические условия в верхней части “базальтового” слоя способствуют активному развитию гидратации пород, независимо от типа генерации воды и способа ее проникновения. Гидратированный слой экранирует продвижение вверх глубинных газов и надкритического пара. По-видимому, с этим свойством может быть связано то обстоятельство, что в Японском море не известны крупные скопления газогидратов.

Рассмотренные флюидодинамические режимы безусловно представляют собой крайние проявления всего спектра возможных комбинаций, определяемых локальными изменениями вещества, структуры, тектоники и т.д. Вместе с тем, очевидно, что комплексный анализ, аналогичный проведенному, при условии детализации в первую очередь электрометрических работ, открывает возможность изучения путей миграции флюида в земной коре и тем самым развить новые подходы к прогнозированию размещения полезных ископаемых, сейсмической активности и т.д.

Авторы статьи выражают искреннюю признательность доктору химических наук Тищенко Павлу Яковлевичу за ценные консультации в области термодинамики, проведенные термодинамические расчеты и активное участие в дискуссиях на всех этапах подготовки статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 11-05-98580-р_восток_a, РФФИ № 11-05-92101-ЯФ_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валитов М.Г. Структурно-плотностная трансформация земной коры в зоне сочленения Центральной котловины Японского моря с континентом: Автореф. дис.... канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 2009. 24 с.
2. Валитов М.Г., Кононец С.Н., Кулинич Р.Г. Структурно-плотностные модели земной коры зоны сочленения Центральной котловины с прилегающим континентом // Дальневосточные моря России. Т.3. Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 53–60.
3. Ваньян Л.Л., Пальшин Н.А., Никифоров В.М. Изучение теллурического поля с использованием кабеля, пересекающего Японское море // Физика Земли. 1999. № 7. С. 17–26.
4. Кадик А.А., Луканин О.А. Дегазация верхней мантии при плавлении. М.: Наука, 1986. 89 с.
5. Колпащикова Т.Н. Программа моделирования магнитного, гравитационного полей и некоторых их производных / А.с. Российская Федерация № 200761354; заявл. 25.06.07; опубл. 21.08.07, Бюл. Программы для ЭВМ, базы данных № 3, 2007.
6. Кузнецов В.А., Никифоров В.М., Старжинский С.С. Роль глубинных разломов при изучении литосферы Японского моря с использованием подводного кабеля Находка-Наоцу // Физика Земли. 2001. № 4. С. 74-76.
7. Кулинич Р.Г. Плотностная модель земной коры по профилю Цусимский пролив – зал. П.Великого // Геофизика дна Японского моря. Владивосток: Наука, 1980. С. 5–12.
8. Кулинич Р.Г., Маслов Л.А., Гильманова Г.З., Комова О.С. Плотностная модель и напряженное состояние в земной коре северной части Японского моря // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 108–114.
9. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Николаев С.М., Колпащикова Т.Н. Рельеф поверхности Мохо и типы земной коры в северо-западной части Японского моря по гравиметрическим данным // Дальневосточные моря России. Т. 3. Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 48–52.
10. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Мощность и типы коры под Японским морем по данным морской и спутниковой гравиметрии // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 6. С. 3–13.
11. Летников Ф.А. Глубинные флюиды Земли // Российская наука: грани творчества на грани веков: Сб. науч.-популяр. статей / Под ред. акад. В. П. Скулачева. М.: Науч. мир, 2000. С. 330–341.
12. Магматические горные породы. Т. 5. М.: Наука, 1988. 489 с.
13. Никифоров В.М., Дмитриев И.В. Геоэлектрический разрез тектоносферы в зоне сочленения Япономорской впадины с материковым обрамлением // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 6. С. 3–14.
14. Родкин М.В., Семенов В.Ю. Аномалии электропроводности мантии Сахалина в сравнении с другими регионами // Физика Земли. 1995. № 2. С. 53–60.
15. Родников А.Г., Гайнанов А.Г., Ермаков Б.В. и др. Геотраверс Сихотэ-Алинь–Японское море–о.Хонсю–Тихий океан // Тихоокеан. геология. 1982. № 3. С. 84–89.
16. Романовский, Н.П. Петрофизика гранитоидных рудно-магматических систем Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1987. 190 с.

17. Руденко А.П., Кулакова И.И. Глубинный синтез углеводородов нефти и газа в открытых каталитических системах и возможность существования месторождений с самовозобновляемыми запасами // Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2006. С. 68-83.
18. Сокарев А.Н., Кулинич Р.Г., Прошкина З.Н. Петрофизика япономорского сектора зоны перехода от континента к Тихому океану: Справочник физических свойств горных пород. Владивосток: Дальнаука, 2010. 216 с.
19. Старжинский С.С., Никифоров В.М. Результаты электромагнитных зондирований с помощью подводного кабеля JASC // Физика Земли. 2011. № 3. С. 72–82.
20. Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98–141.
21. Wannamaker P.E., Stadt J.A., Rejol A. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1987. V. 88. P. 277–296.

Рекомендована к печати Т.К. Злобиным

V.M. Nikiforov, R.G. Kulinich, M.G. Valitov, I.V. Dmitriev, S.S. Starzhinsky, G.N. Shkabarnya

Specific features of the fluid lithospheric regime in the junction zone of South Primorye and Sea of Japan from geophysical data

New data on the fluid lithospheric regime in the junction zone of the continent and marginal seas are presented. For the first time a comprehensive interpretation of the geophysical methods has been used to solution of this problem including magnetotelluric and magnetovariation exploration and unique investigations of the variations of the electric field on JASC (Japan Sea Cable), and structural-density modeling, thermometry and thermodynamics. A joint analysis of distribution of electric conductivity, density and temperature in the lithosphere enabled substantiation of participation of mantle fluids in the formation of structural-matter complexes which are quite different beneath the continent and marginal Sea of Japan.

Key words: fluid regime, hydration, magneto-telluric exploration, geoelectric profile, structural-density modeling, JASC, Sea of Japan.