

**СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ ПО
ДАНЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ПЛОТНОСТНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В.Б. Каплун, М.Ю. Носырев

ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000; e-mail: kaplun@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.

По результатам сопоставления геоэлектрических и плотностных разрезов, построенных по результатам трехмерной инверсии по трем профилям, расположенным на Южном Сихотэ-Алине, выявлены закономерности распределения электрических и плотностных параметров, определены связи между ними, получены новые данные о строении земной коры и верхней мантии региона. Сделано предположение о связи некоторых плотностных и электрических неоднородностей в верхней мантии с процессами позднемеловой субдукции.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, плотностное моделирование, земная кора, верхняя мантия, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Район исследований включает в себя южную часть Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС) и сопредельный с ней Ханкайский массив [7]. Изучаемая территория расположена на восточной окраине Евразийского континента и является пассивной континентальной окраиной, которая сформировалась в процессе среднеюрско-меловой аккреции к Сибирскому кратону различных по происхождению террейнов [29].

Ранее основой для глубинных построений в пределах САСС и сопредельных территорий являлись результаты глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), глубинность которых достигает 40–45 км [5, 25]. Значительная информация о глубинном строении была получена в результате интерпретации поля силы тяжести и гравитационного моделирования по сейсмическим профилям. Эти данные обосновали значительный вклад в создание региональных отрицательных аномалий поля силы тяжести крупных гранитоидных интрузий, а для ряда рудных районов было показано разуплотнение вещества также на уровне верхней мантии [3, 16, 26]. Большой вклад в понимание строения земной коры и верхней мантии дали результаты магнитотеллурических зондирований (МТЗ), глубинность которых может достигать первых

сотен километров. На территории САСС и Ханкайском массиве выполнен значительный объем МТЗ, который позволяет получить представление об общем геоэлектрическом разрезе южной части САСС [2, 4, 20–23, 28 и др.]. Однако для более детального представления о глубинном строении и пространственном распространении тех или иных геоэлектрических неоднородностей в земной коре и верхней мантии существующего объема МТЗ на сегодняшний день недостаточно. Сложность выделения геоэлектрических структур на территории САСС и сопредельном с ней Ханкайском массиве связана с сильной гетерогенностью этих структур как в плане, так на глубину. Это, вероятно, вызвано процессами субдукции и последующим режимом трансформной окраины континента, приведшими к крупномасштабным перемещениям блоков земной коры и верхней мантии, внедрением значительных объемов магматических тел и излиянием вулканических образований различного состава.

В последние годы Институтом тектоники и геофизики ДВО РАН были выполнены детальные МТЗ по трем профилям, расположенным в южной части САСС и на Ханкайском массиве на расстоянии 80–150 км друг от друга, для которых, по результатам 3D инверсии, построены геоэлектрические модели [10, 11, 12]. Целью выполненных работ являлось изучение строения литосферы САСС и сопредельных террито-

рий. В результате был выявлен ряд геоэлектрических неоднородностей, не нашедших ранее отражения на разрезах ГСЗ и не увязанных с современными представлениями о глубинном строении и тектонике региона. Кроме этого, полученные электрические характеристики ряда глубинных разломов, их изменчивость для отдельных профилей дают информацию о возможной современной геодинамике данных структур. Однако в связи со значительным расстоянием между профилями, определенной ограниченностью интерпретации по данным одного метода и для повышения достоверности выделяемых физических неоднородностей и границ в земной коре и мантии для рассматриваемой территории были привлечены данные по 3D плотностной модели, полученной на основе инверсии поля силы тяжести.

Таки образом, целью настоящей работы является изучение строения литосферы южной части САСС и сопредельного с ней Ханкайского массива на основе совместной интерпретации геоэлектрической и плотностной моделей до глубины 140–150 км.

ТЕКТОНИКА

Район исследований включает в себя южную часть Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС) и сопредельный с ней Ханкайский массив [7]. Изучаемая территория расположена на восточной окраине Евразийского континента и является пассивной континентальной окраиной, которая сформировалась в процессе среднеюрско-меловой аккреции к Сибирскому кратону различных по происхождению террейнов [29].

На рассматриваемой территории выделяется несколько различных геодинамических этапов [11, 17, 18, 30]. В позднем мелу здесь предполагается субдукционный режим, сопровождавшийся сжатием литосферы и вулканизмом с преобладанием кислых эффузивов. В эоцен-олигоцен-раннемиоценовое время субдукционный режим сменился на режим растяжения литосферы с разрывом познемелового слэба, масштабным плавлением континентальной коры и излиянием основных и кислых магматитов. В позднем миоцене-плиоцене происходит формирование новой, Курило-Камчатской зоны субдукции, которая сменила конвективный режим мантийных потоков и состав образующихся магм.

Сихотэ-Алинская складчатая система протягивается в северо-восточном направлении почти на 1500 км от южного побережья Приморья до южного побережья Охотского моря. Южная часть САСС на западе граничит с Ханкайским массивом по разломам – Арсеньевскому, Алчанскому. Восточная граница САСС скрыта под водами Японского моря. Складчатая система состоит из Западной, Центральной,

Восточной и Прибрежной структурно-формационных зон, представляющих собой крупные тектонические блоки. Формирование САСС началось в неокме и продолжалось вплоть до позднего альба в обстановке трансформной окраины при крупномасштабных левосторонних перемещениях по системе окраинно-континентальных сдвигов. Формирование новообразованной континентальной литосферы завершилось внедрением больших объемов гранитоидных магм, образовавших тела хунгарийского и татибинского комплексов. Постаккреционными образованиями пояса являются комплексы поздемеловых и кайнозойских вулканитов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (ВСАВП). Вулканиты пояса перекрывают складчатые структуры Прибрежной и Восточной зон, а отдельные его звенья заходят далеко на запад и залегают на всех более древних образованиях, вплоть до раннепротерозойских [7] (рис. 1).

Ханкайский массив имеет сложное строение и представлен блоками докембрийского кристаллического фундамента (Матвеевская, Нахимовская, Гродековская и Сергеевская зоны), разделенными структурами деформированного чехла, сложенными раннепалеозойскими формациями [7].

Основными разломами на изучаемой территории являются: Центральный Сихотэ-Алинский (ЦСАР), Меридиональный, Самаркинский, Арсеньевский, Фурмановский, Среднеханкайский, Партизанский [7] (рис. 1).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На Южном Сихотэ-Алине выполнено три профиля магнитотеллурических зондирований (МТЗ) (рис. 1). Измерения электромагнитного поля выполнены в диапазоне частот от 10 кГц до $4 \cdot 10^{-4}$ Гц со средним шагом 5 км. Длина профилей составила от 250 до 290 км. Проведен анализ искажений кривых МТЗ и выполнена их интерпретация в рамках трехмерной модели по программе ModEM [31]. По результатам инверсии построены геоэлектрические разрезы до глубины 150 км.

Для совместной интерпретации с магнитотеллурическими данными была привлечена трехмерная плотностная модель литосферы Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающей с запада территории [8]. Модель была рассчитана в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН. В качестве исходного материала для расчета была использована цифровая модель гравитационного поля в редукции Буге континентальной части Дальнего Востока России масштаба 1:1 000 000, подготовленная по заказу ИТиГ

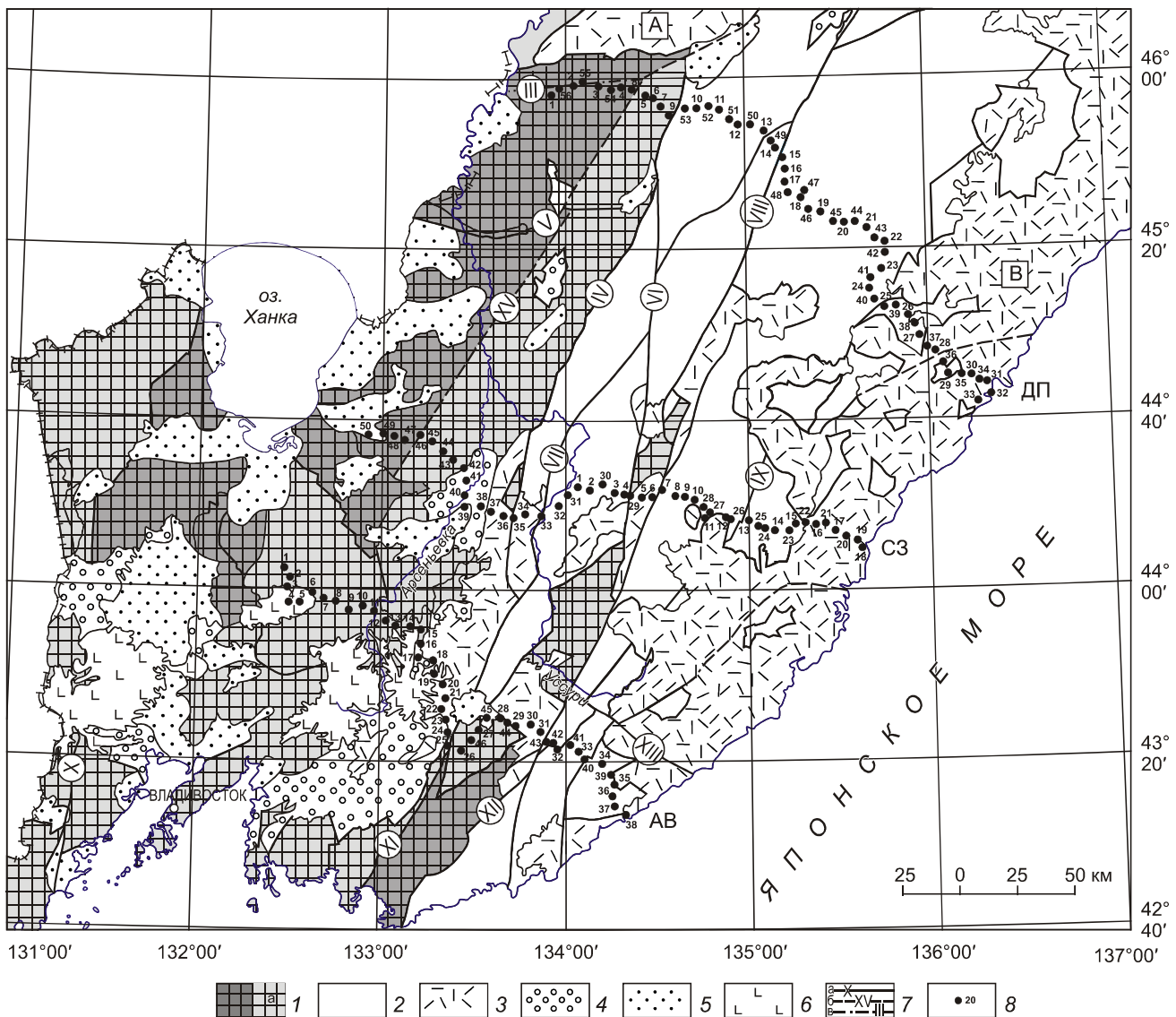


Рис. 1. Схема геолого-структурного районирования [6] с профилями МТЗ [10, 11, 12].

1 – Ханкайский массив, в том числе: а – структуры деформированного чехла Ханкайского массива; 2 – Сихотэ-Алинская складчатая система; 3 – окраинно-континентальные вулканические структуры: А – Алчанский ареал, В – Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс; 4 – наложенные меловые впадины; 5 – кайнозойские континентальные впадины; 6 – покровы плато-базальтов; 7 – разрывные нарушения (а – достоверные, б – предполагаемые, в – скрытые): III – Дальнереченский, IV – Арсеньевский, V – Кабаргинский, VI – Меридиональный, VII – Самаркинский, VIII – Центральный, IX – Фурмановский, X – Западно-Приморский, XI – Партизанский, XII – Кривинский, XIII – Южно-Приморская группа разломов, XV – Среднеханкайский; 8 – пункты МТЗ и их номера профилей: ДП – г. Дальнереченск–п. Пластун, СЗ – г. Спасск-Дальний–бух. Зеркальная, АВ – с. Абражеевка–п. Валентин.

ДВО РАН сотрудниками ВСЕГЕИ (модель 1971). Расчет выполнен в программном комплексе КОСКАД [14, 24] с использованием известного способа вариаций Б.А. Андреева [1], который был улучшен авторами комплекса на этапе выделения составляющих поля определенных частот за счет применения современных методов адаптивной полосовой фильтрации [13, 27]. Размер ячейки в использованной цифровой модели поля силы тяжести составлял 10

км. Согласно алгоритму, заложенному в комплексе КОСКАД, на первом этапе осуществляется адаптивная фильтрация поля в окнах размерами 3×3 , 5×5 , 7×7 ячеек модели и т.д. до $0.3L$, где L – максимальный размер анализируемой площади. Оценка глубин осуществляется по локальной составляющей поля, полученной как разность составляющих двух соседних окон. В результате расчетов получается относительное распределение масс на некоторых

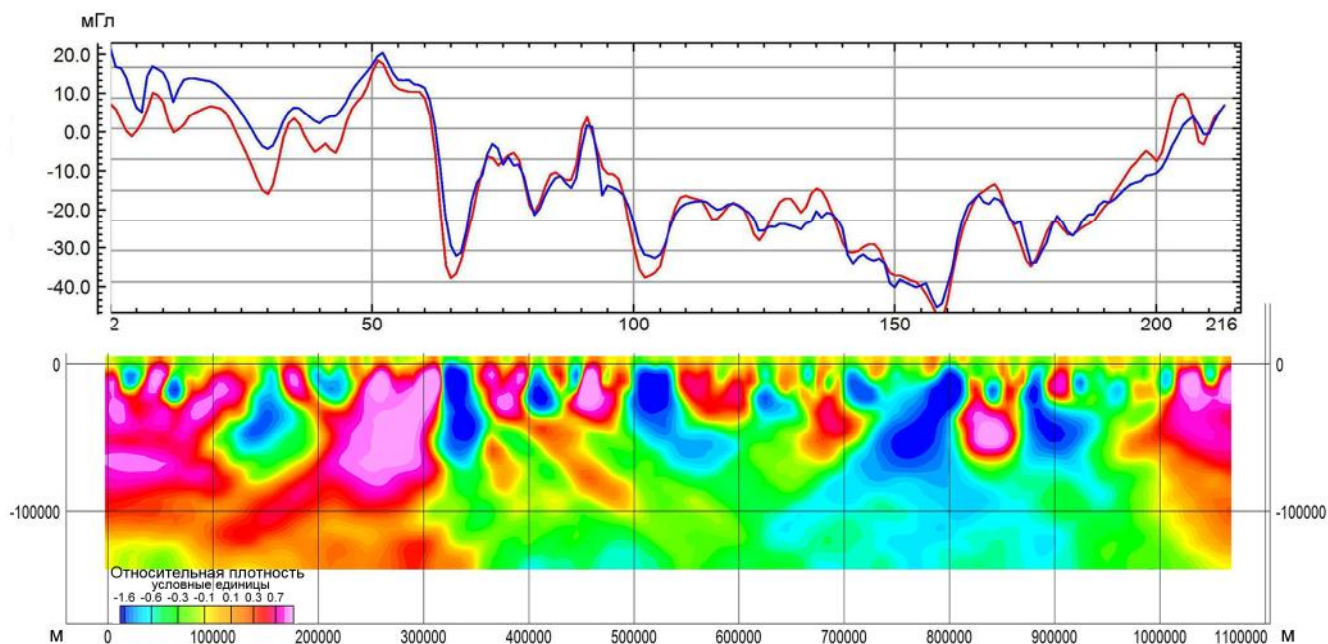


Рис. 2. Сравнение результатов решения прямой задачи с трансформированным полем силы тяжести.

Синий график – остаточные аномалии поля силы тяжести на высоте 60 км. Красный график – результат решения прямой задачи от полученной плотностной модели.

глубинах. Данные глубины определяются размером сетки исходной цифровой модели и алгоритмом расчета, заложенным в программе [13]. В нашем случае шаг по глубине составил 6.66 км. Эти данные были пересчитаны в окончательную сеточную модель с размером ячейки $10 \times 10 \times 5$ км. Учитывая неизменный размер элементов модели, можно считать, что полученное распределение масс фактически пропорционально распределению аномальной плотности (со своим знаком относительно 0), характеризующей аномалиеобразующие тела данного глубинного уровня, создающие гравитационные аномалии, соответствующие локальной составляющей общего гравитационного поля в данном частотном (глубинном) интервале. Поэтому в дальнейшем при рассмотрении разрезов для этой величины будем использовать термин относительная плотность (ОП).

В комплексе также заложен алгоритм пересчета полученных данных в реальные плотности [14]. Выполненный на этой основе расчет для 12 глубинных уровней показал, что значению 1.0 относительного распределения масс или относительной плотности устойчиво соответствует значение реальной аномальной плотности в 0.05 г/см^3 . Применяемый метод изначально имеет дело с локальной составляющей поля силы тяжести, и после завершения расчета всегда остается неучтенная низкочастотная компонента

поля, которая отражает плотностные неоднородности ниже принятой глубины расчета.

Для оценки адекватности полученной модели было выполнено решение от нее прямой задачи. Расчет также выполнялся в программном комплексе КОСКАД. Сравнение выполнено с картой остаточных аномалий на высоте 60 км. Результат такого сравнения по одному из профилей показан на рис. 2.

Рассмотренная модель была использована для построения распределения относительной плотности по линиям МТЗ. Данные разрезы построены по линии, проходящей от точки к точке МТЗ. Положение профилей МТЗ на фоне поля силы тяжести, пересчитанного на высоту 5 км, показано на рис. 3.

Дополнительно для выделения отдельных слабо выраженных плотностных границ и подчеркивания некоторых особенностей распределения плотности, особенно в верхней мантии, для разрезов был рассчитан ряд дополнительных параметров: градиент изменения плотности вдоль профиля (ГП), градиент изменения плотности по глубине (ГГ), аналитический сигнал (АС). Для анализа соотношения плотностных и геоэлектрических неоднородностей был рассчитан коэффициент ранговой корреляции (КРК) между электрическим сопротивлением и относительной плотностью. Все перечисленные параметры были рассчитаны в программном комплексе КОСКАД.

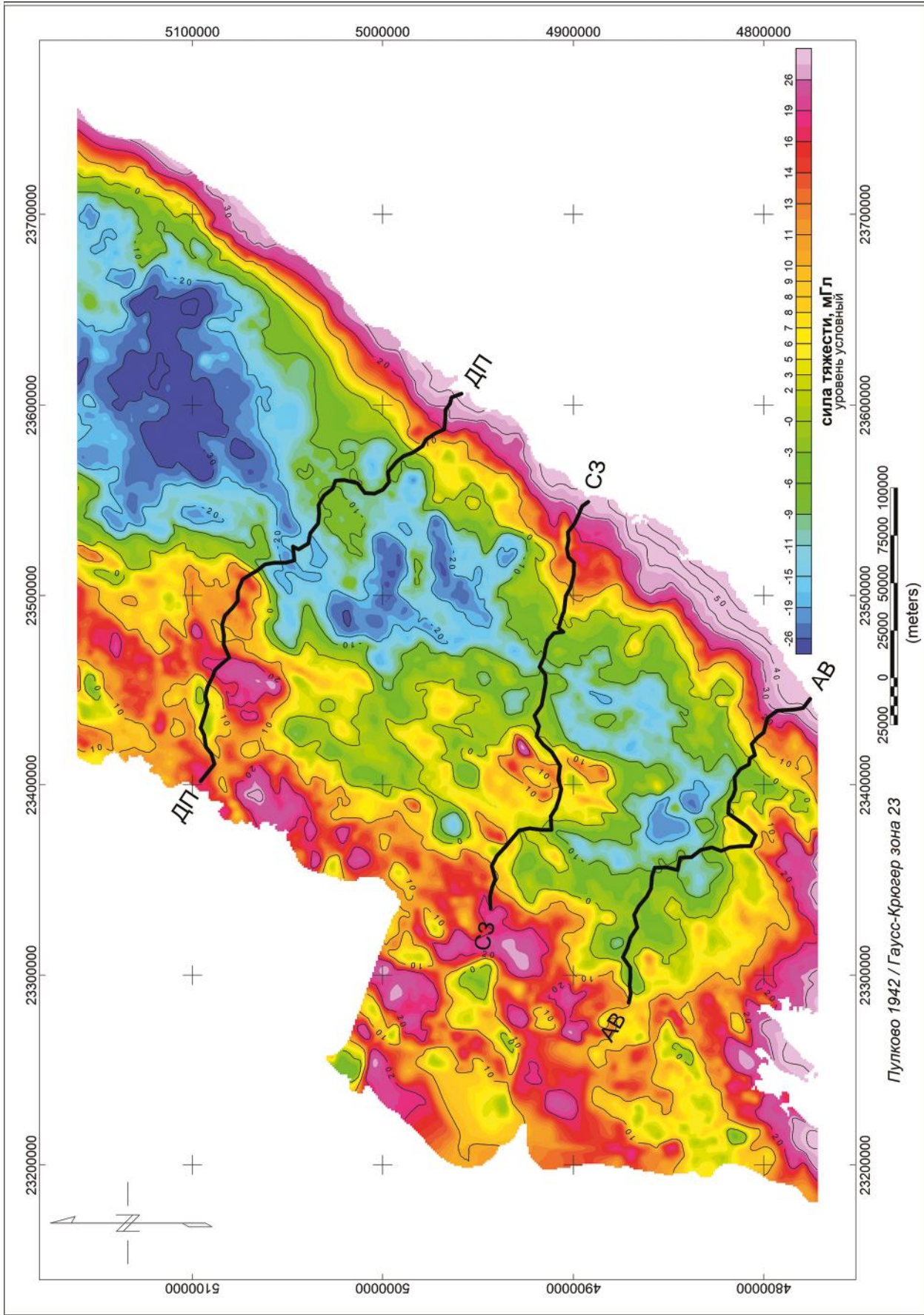


Рис. 3. Поле силы тяжести в редукции Буге на высоте 5 км и положение профилей МТЗ.

Градиент вдоль профиля – горизонтальный градиент изменения относительной плотности, рассчитанный в скользящем окне размером 3×3 точки по направлению вдоль профиля. Фактически он отвечает производной по данной оси и своими экстремумами соответствует точкам максимального изменения параметра. Градиент по данному направлению рассчитывался для выделения вертикальных и слабонаклонных границ петроплотностных неоднородностей в разрезе. Данная задача представляется актуальной, поскольку в ряде случаев геоэлектрические неоднородности совпадают с границами петроплотностных неоднородностей.

Градиент по глубине. Тот же параметр рассчитан по направлению вниз от поверхности. Это сделано для выделения и подчеркивания в разрезе субгоризонтальных границ наиболее резкого изменения плотности.

Аналитический сигнал – величина, равная корню квадратному из суммы квадратов производных по трем направлениям X, Y, Z . Фактически соответствует полному градиенту, рассчитанному в скользящем окне, и отражает степень плотностной изменчивости по разрезу.

КРК – коэффициент ранговой корреляции между электрическим сопротивлением и относительной плотностью, рассчитан в скользящем окне размером 5×5 точек, с расстоянием между точками 5 км. Размер окна выбран опытным путем.

На рис. 3 видно, что по отношению к региональным элементам гравитационного поля все профили занимают примерно одинаковую позицию. Начинаются в западной части на относительно высоком поле, при движении на восток пересекают протяженный Сихотэ-Алинский минимум поля силы тяжести шириной в несколько сотен километров и далее при приближении к береговой линии уровень поля вновь повышается. Понижения поля силы тяжести связаны в значительной степени с наличием гранитных батолитов в верхней-средней частях земной коры [16]. Вместе с тем, как будет показано ниже, определенный вклад в понижение поля силы тяжести вносит и мантийное разуплотнение.

Поскольку плотность и электрическое сопротивление являются параметрами, на значения которых могут влиять одни и те же факторы, что обуслови-

вает во многих случаях устойчивые статистические связи между ними, то их совместное рассмотрение, во-первых, вполне правомерно и, во-вторых, дает важный материал для понимания природы выявленных аномалий. Учитывая, что электроразведка выполнена по отдельным линиям, достаточно далеко отстоящим друг от друга, гравиметрическая карта и карты плотностных неоднородностей позволяют проследить корреляцию между отдельными элементами геоэлектрических разрезов, т.е. плотностная модель, заполняя пустое пространство между профилями МТЗ, дает возможность обоснованной плановой увязки геоэлектрических неоднородностей, полученных по разрезам. Выделенные геологические элементы, которые подтверждаются независимо двумя параметрами, повышают устойчивость интерпретационных построений. В конечном итоге совместная интерпретация геоэлектрической и плотностной моделей увеличивает достоверность как выделяемых физических неоднородностей, так и в целом глубинной модели.

Земная кора и её мощность трактуются согласно данным ГСЗ по работам [5, 25].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

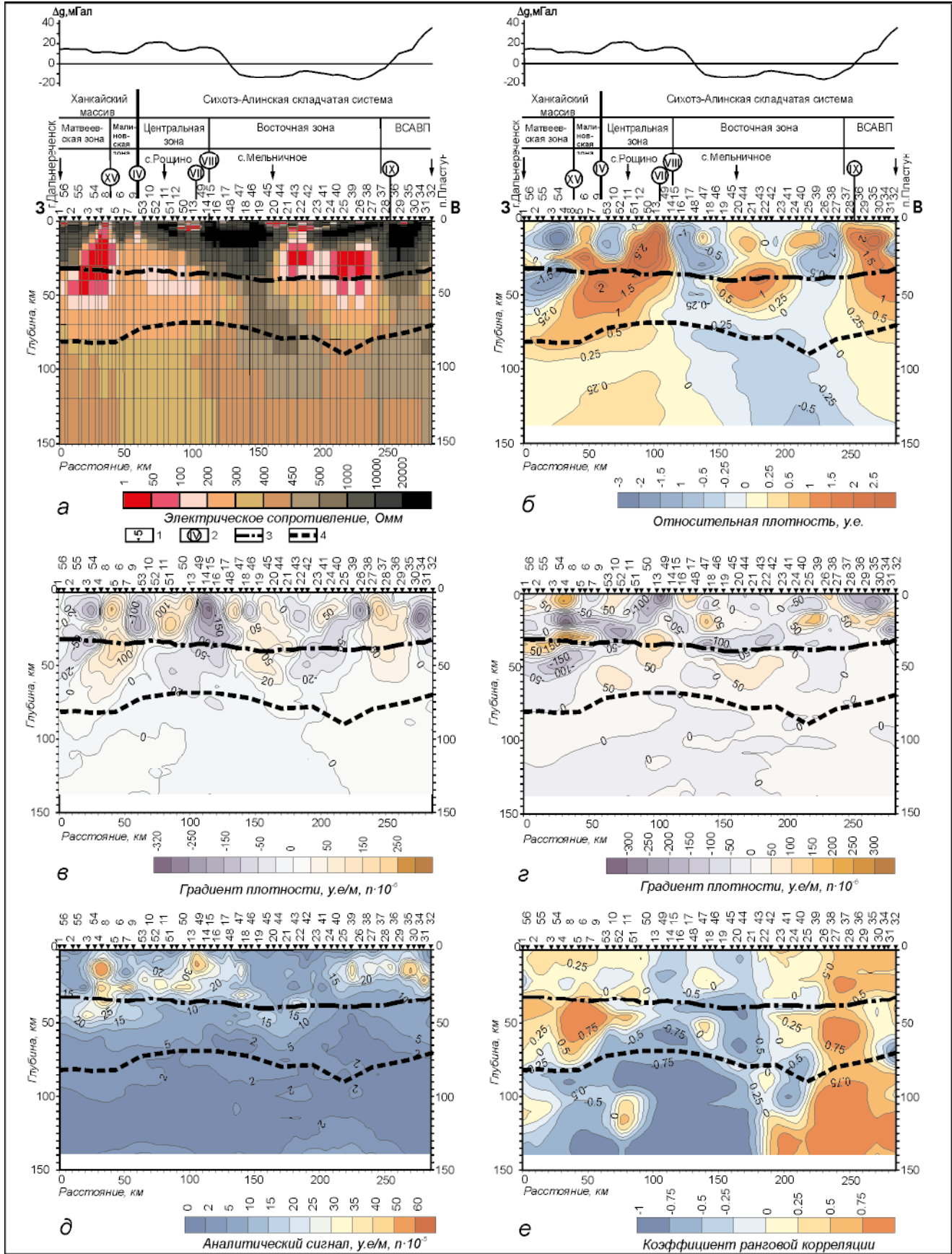
Профиль г. Дальнереченск – п. Пластун (ДП)

Земная кора геоэлектрического и плотностного разрезов (рис. 4, а, б) характеризуется неоднородным строением. Их верхняя часть насыщена телами с очень высокими, свыше 20 тыс. Ом·м, и с очень низким, менее 50 Ом·м, электрическим сопротивлением, высокой и низкой плотности.

Ханкайский массив в целом характеризуется повышенным ЭС, и разделен на два блока зоной низкого ЭС, имеющей западное падение, уходящей своими корнями в верхнюю мантию до глубины около 50 км. Она, вероятно, связана со Среднеханкайским разломом. На плотностном разрезе зоне низкого ЭС отчетливо соответствует зона пониженной плотности, также прослеживающаяся до глубины 50 км и имеющая схожую с геоэлектрической зоной морфологию: вертикальная восточная граница, соответствующая собственно разлому, и западная граница, под углом 70° падающая на запад. Здесь наиболее отчетливо выделяется блок, заключенный между Среднеханкайским и Арсеньевским разломами.

Рис. 4. Разрезы по профилю г. Дальнереченск–п. Пластун (ДП).

a – геоэлектрический: 1 – пункты МТЗ и их номера, 2 – основные разломы и их номера, 3 – подошва земной коры по данным ГСЗ [5, 25], 4 – выделенная граница в верхней мантии; *б* – плотностной; *в* – градиент изменения плотности вдоль профиля; *г* – градиент изменения плотности по глубине; *д* – аналитический сигнал; *е* – коэффициент ранговой корреляции между электрическим сопротивлением и относительной плотностью.



В пределах земной коры САСС соотношение геоэлектрических и плотностных неоднородностей носит иной характер. На геоэлектрическом разрезе земная кора представлена блоками высокого ЭС различного размера, разделенными субвертикальными зонами низкого ЭС. Отдельные тела повышенного и пониженного ЭС прослеживаются в верхнюю мантию. На плотностном разрезе земная кора представлена чередованием блоков пониженной и повышенной плотности.

Центральная зона САСС представлена двумя блоками – пониженной и повышенной относительной плотности. При этом на уровне верхней мантии отмечается погружение блока повышенной плотности в западном направлении под Ханкайский массив. На геоэлектрическом разрезе такой тенденции отчетливо не просматривается.

Геоэлектрический разрез Восточной зоны в пределах земной коры представлен тремя блоками: западным, характеризующимся очень высоким сопротивлением практически на всю ее мощность, центральным, с пониженными ЭС, и восточным, имеющим очень высокое ЭС до глубин около 20 км, а ниже, до подошвы земной коры, характеризующийся аномально низким сопротивлением.

Западный блок характеризуется минимальными значениями относительной плотности и довольно точно совпадает с областью повышенного сопротивления. Это связано с наличием гранитных интрузий в земной коре, развитых до глубин 12–15 км. Отмечается, что область повышенного сопротивления, хорошо совпадающая с зоной пониженной плотности, практически вертикально прослеживается в мантию.

Центральный блок пониженного сопротивления, пикеты (45–23), на уровне земной коры характеризуется слабо повышенной и близ нулевой относительной плотностью, а на уровне нижней коры и верхней мантии наблюдается тело повышенной плотности, совпадающее со слабым повышением сопротивления. С геологической точки зрения этот блок характеризуется минимальным проявлением интрузивного гранитоидного магматизма и является перемышкой между ареалами интенсивной гранитизации земной коры, соотносимыми с минимумами поля силы тяжести, расположенными севернее и южнее. Поэтому можно говорить о преобладании разновозрастных осадочных пород в верхней части земной коры, с чем можно связывать относительное понижение сопротивления.

Третий, самый восточный блок имеет высокое ЭС до глубины 20 км и очень низкое, начиная с этой глубины и до 60 км. Данное понижение ЭС, особенно интенсивное на уровне нижней коры, совпадает с

понижением относительной плотности, которое прослеживается на глубину и соединяется с зоной общего мантийного разуплотнения, развитой до изученных глубин. Однако на поверхность данная зона разуплотнения выходит только в узком интервале и в сопротивлении не фиксируется.

При рассмотрении данных неоднородностей надо учесть, что эта часть профиля проходит вдоль северной границы обширного минимума поля силы тяжести (рис. 3), расположенного южнее. Вероятно рассмотренная неоднородность в низах коры связана с ее преобразованием при формировании гранитоидных интрузий, основные тела которых расположены южнее, а здесь этот процесс в верхней части коры имел ограниченный характер.

Восточная и западная границы Восточной зоны выделяются на плотностном разрезе как зоны отрицательных значений относительной плотности, направленных навстречу друг другу. Здесь же в земной коре Восточной зоны выделяется структура встречного падения двух блоков повышенной ОП. Подобную структуру можно выделить и на геоэлектрическом разрезе, но из-за наличия в её центральной части зоны низких ЭС она отчетливо не прослеживается. Структура встречного падения или чашеобразная структура выделяется и на разрезах градиентов ОП (рис. 4, в, г), а на разрезе аналитического сигнала эта структура охватывает всю земную кору, погружаясь в верхнюю мантию.

ВСАВП характеризуется повышенными значениями ЭС и относительной плотности. Пояс отчетливо выделяется на всех разрезах, и наиболее характерно проявляется его граница с Восточной зоной, проходящая по Фурмановскому разлому.

Основные разломы на геоэлектрическом разрезе проявляются как субвертикальные зоны низких или пониженных ЭС, а на плотностном – как границы между блоками различной плотности. Наиболее контрастно их положение видно на разрезе градиента вдоль профиля (рис. 4, в).

Подошва земной коры ни на геоэлектрическом, ни на плотностном разрезах явно не выражена. Её положение наиболее проявлено в распределении градиента ОП по глубине (рис. 4, г) как нижняя граница области его повышенных значений. Однако эта тенденция нарушается в зонах разломов и в пределах Ханкайского массива. Под последним наблюдается разделение распределения значений повышенных значений на две ветви, одна из которых воздымается к поверхности, а вторая погружается под массив. Положение подошвы земной коры здесь совпадает с низкими значениями градиента относительной плотности

по глубине. Положение подошвы земной коры также выделяется и в аналитическом сигнале (рис. 4, *д*) по нижней границе повышенных значений, но только в западной и центральной частях разреза. В восточной части эта граница воздымается вверх от подошвы земной коры и только в крайней восточной части профиля они опять сходятся. Под Ханкайским массивом подошва земной коры рассекает зону повышенных значений аналитического сигнала.

Верхняя мантия в пределах профиля имеет сложное строение как по результатам МТЗ, так и по гравитационным данным. На геоэлектрическом разрезе в основании земной коры и до глубины 70–80 км выделяется неоднородный слой пониженного ЭС от 100 до 300 Ом·м, а глубже наблюдается увеличение сопротивления до 400–500 Ом·м. Здесь также отмечаются более высокие сопротивления восточнее ЦСАР. Характерной особенностью является наличие области повышенного сопротивления, погружающейся от основания земной коры, примерно восточнее ЦСАР, в восточном направлении до глубины примерно 120 км. Подобное наблюдается под ВСАВП, но только в западном направлении. На плотностном разрезе также видно, что верхняя мантия западнее ЦСАР и под ВСАВП имеет повышенную плотность по сравнению с центральной частью разреза. Исключение составляет подкорковая часть верхней мантии под Ханкайским массивом, имеющая пониженную плотность и электрическое сопротивление. На разрезах градиента и аналитического сигнала различия разных частей верхней мантии вдоль профиля проявлены слабо, хотя отмеченная выше тенденция и сохраняется.

Рассмотрение разреза КРК (рис. 4, *е*) показывает, что наилучшая прямая связь между электрическим сопротивлением и ОП отмечается под ВСАВП как в земной коре, так и верхней мантии, и под Ханкайским массивом, но только в пределах земной коры и в подкорковой части верхней мантии. Остальная часть разреза характеризуется обратной зависимостью между этими параметрами, особенно в верхней мантии. По характеру изменения дополнительных параметров и КРК для мантии была выделена ещё одна условная граница, которая отделяет ее верхнюю часть с большей дифференциацией параметров от нижней, где дифференциация минимальна. Наложение данной границы на геоэлектрический разрез показывает, что она является подошвой верхнемантийного проводящего слоя. Её форма почти конформна подошве земной коры, за исключением Ханкайского массива.

Таким образом, в результате совместной интерпретации результатов МТЗ и гравиметрии профиля ДП подтверждено наличие двух блоков Ханкайского массива с различными физическими свойствами,

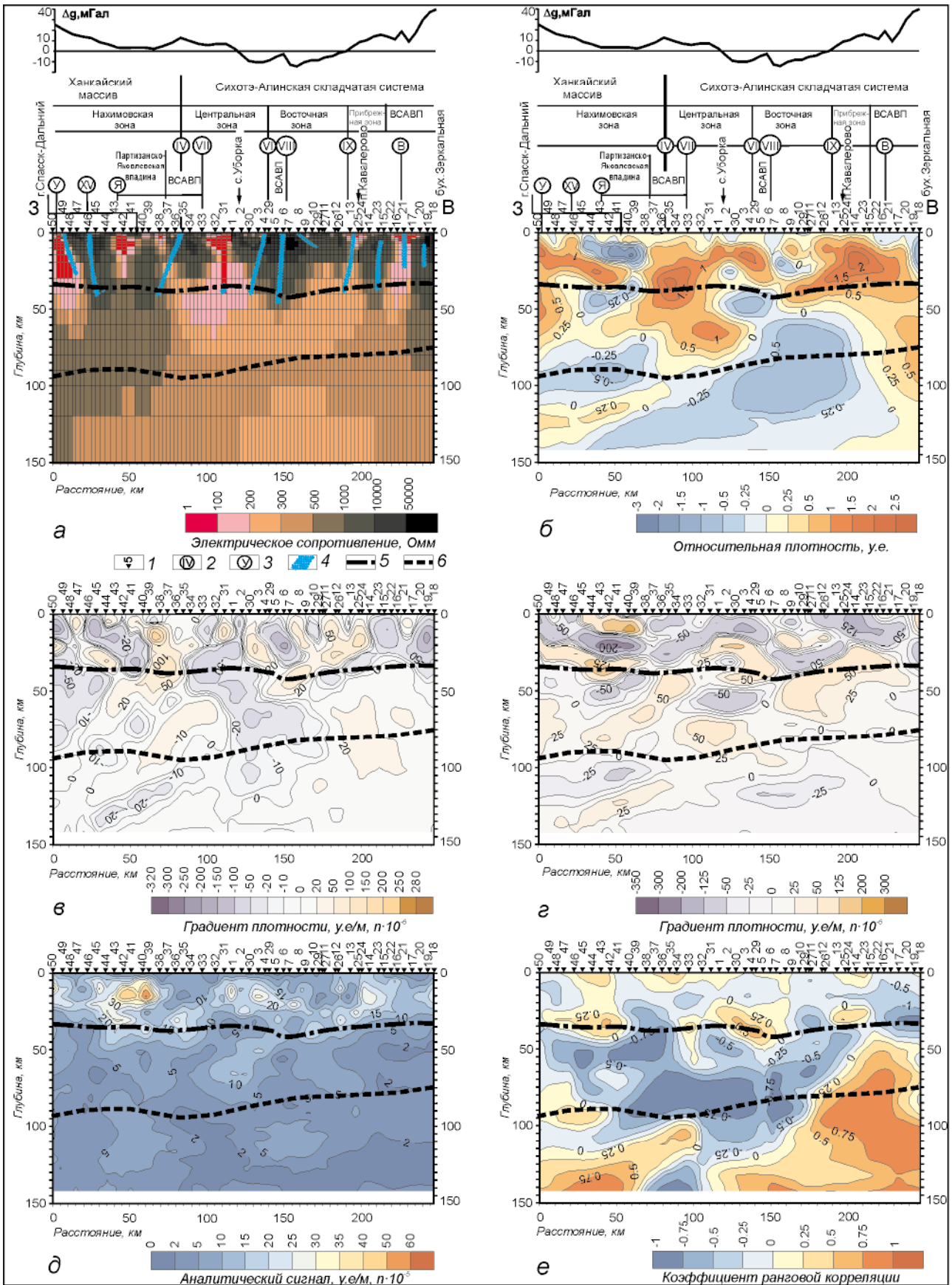
граница между которыми проходит по Среднеханкайскому разлому. Показаны особенности проявления основных разломов на геоэлектрических и плотностных разрезах, взаимосвязь характеризующих их параметров. Выявлены плотностные и геоэлектрические границы в верхней мантии, погружающиеся под Ханкайский массив. Выявлена структура встречного падения в центральной части Восточной зоны. Показано, что ВСАВП характеризуется повышенными значениями ЭС и относительной плотности, прослеживающимися от верхней части земной коры в верхнюю мантию до глубины 100–120 км. Установлена граница в верхней мантии на глубине 70–80 км, которая является подошвой верхнемантийного проводящего слоя, который характеризуется также повышенной плотностной неоднородностью.

Профиль г. Спасск-Дальний–бух. Зеркальная (СЗ)

На геоэлектрическом разрезе (рис. 5, *а*) земная кора представлена несколькими блоками высокого ЭС, разделенными субвертикальными зонами низких ЭС, отождествляемых с глубинными разломами. На плотностном разрезе (рис. 5, *б*) земная кора состоит из трех блоков повышенной относительной плотности сложной формы, разделенных зонами понижений.

Земная кора Ханкайского массива на геоэлектрическом разрезе представлена двумя блоками высокого ЭС от 1000 до 5000 Ом·м, ограниченных со всех сторон зонами низкого ЭС. В крайней западной части разреза отмечается восточное падение их границ, что согласуется с результатами ГСЗ. На плотностном разрезе земная кора массива представлена телами повышенной и пониженной ОП с отчетливо выраженным падением в восточном направлении вплоть до его восточной границы, проходящей по Арсеньевскому разлому. Восточное ограничение Ханкайского массива на геоэлектрическом разрезе выражено более контрастно, чем на плотностной модели, т.к. его корни наблюдаются в верхней мантии вплоть до глубины 120–150 км с ЭС 500–1000 Ом·м. Партизанско-Яковлевская впадина, наложенная на Ханкайский массив, отражается пониженными значениями ЭС и плотности в верхней части земной коры.

Профиль СЗ проходит между двумя региональными минимумами поля силы тяжести (рис. 3), связанными в основном с крупными телами гранитов в земной коре. Это отчетливо видно на плотностном разрезе на уровне земной коры по отсутствию аномалий пониженной плотности. Только в одном месте можно предположить достаточно масштабное наличие в коре гранитоидных интрузий, район пикетов 5–9, что совпадает с Центральным Сихоте-Алинским



разломом. Вместе с тем, область разуплотнения в мантии фиксируется достаточно отчетливо, т.е. имеет место единая зона разуплотнения, проходящая как под блоками земной коры, насыщенными инрузиями гранитов, так и под разделяющими участками, где гранитоидный магматизм проявлен существенно меньше.

Таким образом, земная кора САСС на плотностном разрезе представлена двумя блоками со слабо повышенной относительной плотностью, разделенными зоной пониженной плотности, проходящей через всю кору до верхней мантии, западная граница которой совпадает с ЦСАР.

Геоэлектрический разрез земной коры САСС имеет более сложное строение и представляет собой чередование блоков с высоким ЭС различной мощности, разделенных субвертикальными зонами низкого ЭС 50–200 Ом·м, которые связаны с основными глубинными разломами.

На плотностном и геоэлектрическом разрезах положение глубинных разломов отражено по-разному. На плотностном разрезе лишь ЦСАР трассируется на всю мощность земной коры как зона пониженной относительной плотности, остальные разломы выражены или как граница между блоками с пониженной и повышенной относительной плотностью (Среднеханкайский разлом), или проявлены в верхней части земной коры понижением плотности. Часть разломов вообще не отражается на плотностной модели.

На геоэлектрическом разрезе основные глубинные разломы (Среднеханкайский, Арсеньевский, Самаркинский, Меридиональный, ЦСАР) также практически не отразились и оказались расположенными в основном внутри зон высокого ЭС, за исключением Фурмановского разлома, который совпадает с вертикальной зоной низкого ЭС. Это, возможно, свидетельствует о том, что основные разломы в настоящее время находятся в режиме регионального сжатия, связанного с процессами коллизии, что приводит к закрытию трещинно-порового пространства и, как следствие, увеличению ЭС. Второстепенные разломы, Уссурийский, Яковлевский, Восточный, которые являются опережающими к основным, наоборот проявляются на геоэлектрическом разрезе как зоны низких ЭС, что связывается с кайнозойским периодом тектонической активизации региона и процессами растяжения земной коры. Это также может сви-

детельствовать об изменении направления действия напряжения.

Вместе с тем, надо отметить, что на профиле выявлено несколько ярких совпадающих геоэлектрических и плотностных неоднородностей. Во-первых, это узкая коро-мантийная проводящая зона, выявленная на пикетах 31–32. Она достаточно уверенно совпадает с почти вертикальной границей плотностной неоднородности, прослеживаемой до глубины 60 км. По характеру соотношения параметров здесь можно предположить наличие разломной зоны.

Также обращает на себя внимание западная граница Ханкайского массива. В общем, по распределению относительной плотности эта граница идентична таковой на предыдущем профиле. Центральная зона смотрится в целом как блок повышенной плотности, уходящий в мантию и на этом уровне погружающийся под Ханкайский массив. Менее плотные неоднородности верхней части разреза в принципе не меняют этой картины.

ВСАВП и его ветви, заходящие в глубь континента, выделяются высокими ЭС и повышенной плотностью, уходят своими корнями в верхнюю мантию вплоть до глубины 80–100 км. Прибрежная часть ВСАВП хорошо выделяется на разрезах дополнительных параметров ОП. На разрезе КРК она отмечается отрицательными значениями коэффициента в земной коре и положительными в верхней мантии, что может свидетельствовать о значительных изменениях или состава пород, или Р-Т-условий под ВСАВП.

Подошва земной коры слабо проявлена как на геоэлектрическом, так и на плотностном разрезах. Как и в предыдущем случае, наиболее устойчиво она смотрится на разрезе с аналитическим сигналом, отделяя верхнюю дифференцированную область от более спокойной нижней.

На плотностном разрезе и его трансформациях (рис. 5, б, в, г, е) в земной коре САСС хорошо выражено встречное падение плотностных неоднородностей с центром в районе ЦСАР. На геоэлектрическом разрезе такая тенденция в явном виде не просматривается. Ещё одной характерной особенностью является западное направление падения плотностных неоднородностей в подкоровой мантии. Они имеют хорошо выраженную тенденцию погружения на запад под углом около 30° и состоят из двух зон разуплотнения, разделенных узкой полосой мантии слабо повышен-

Рис. 5. Разрезы по профилю г. Спасск-Дальний–бух. Зеркальная (СЗ).

a–e – то же, что и на рис. 4, *1* – пункты МТЗ и их номера, *2* – основные разломы и их номера, *3* – второстепенные разломы и их обозначения: У – Уссурийский, Я – Яковлевский, В – Восточный, *4* – зоны глубинных разломов по данным ГСЗ [5], *5* – подошва земной коры по данным ГСЗ [5], *6* – выделенная граница в верхней мантии.

ной плотности. Общая ширина зоны составляет 70–85 км, ширина «вставки» относительно повышенной плотности – 15–25 км. На геоэлектрическом разрезе такое направление простирающихся областей ЭС проявлено слабо. Однако на рис. 5, *e* нижняя граница наклонной зоны видна по смене характера корреляции между плотностью и ЭС с отрицательной (верхняя часть) на высокую положительную корреляцию (нижняя часть разреза).

Таким образом, в результате совместного анализа электрических и плотностных данных по профилю СЗ установлено, что земная кора Ханкайского массива представлена двумя блоками, разделенными Среднеханкайским разломом, и с отчетливо выраженным падением в восточном направлении. Западная граница массива проводится по краевой части блока высокой плотности, который на уровне мантии имеет падение на запад под массив. В земной коре хорошо выражено встречное падение плотностных неоднородностей с центром в районе ЦСАР. В мантии под САСС установлена хорошо выраженная область разуплотнения на глубинах 50–120 км, при этом гранитоидный магматизм и связанное с ним возможное разуплотнение в земной коре проявлены на этом профиле слабо. Под ВСАВП выделена структура с высокими ЭС и повышенной плотностью, прослеживающаяся от верхней части земной коры в верхнюю мантию до глубины 80–100 км. Установлены различия в геоэлектрических характеристиках основных и второстепенных разломов. Первые характеризуются высокими ЭС, а вторые – низкими ЭС, что может являться следствием кайнозойского периода тектонической активизации региона, процессами растяжения земной коры и изменения направления действия напряжений.

Профиль с. Абражеевка–п. Валентин (АВ)

Геоэлектрические и плотностные параметры земной коры показывают хорошую связь при их прямой корреляции (рис. 6, *a*, *b*). Из рисунков видно, что на геоэлектрическом разрезе большая часть блоков имеет высокое ЭС свыше 1000 Ом·м и в основном повышенную относительную плотность, за исключением западной части разреза.

Рассматривая положение профиля относительно аномалий поля силы тяжести (рис. 3), видно, что профиль огибает наиболее интенсивный Южно-Приморский минимум поля силы тяжести и идет по его южной границе. Уплотнение в коре в центральной части профиля связано с тем, что он пересекает южную

границу данного минимума и заходит в краевую часть крупного блока с повышенным уровнем поля силы тяжести.

Граница между Ханкайским массивом и САСС, проходящая по ЦСАР, соответствует на плотностном разрезе краевой части зоны пониженной плотности в земной коре, где она связана с гранитными интрузиями, и уходящей в верхнюю мантию. На геоэлектрическом разрезе этой границе соответствует субвертикальная зона пониженного ЭС, секущая земную кору и также уходящая в верхнюю мантию. При этом видно, что зона пониженного ЭС достаточно точно совпадает с краевой частью понижения плотности, зоной интенсивного градиента этого параметра.

Второй, пересеченный профилем АВ глубинный разлом – Партизанский. Он проявлен в верхней части земной коры как узкая субвертикальная зона пониженного ЭС и отрицательных значений относительной плотности, в средней части коры происходит как бы «закрытие» разлома, а в низах коры и в верхней мантии под ним выделяется обширная область низкого ЭС и отрицательных значений ОП. Возможно, что аномальные тела в низах коры могут быть также связаны и с субширотным разломом, отделяющим южный блок с высоким уровнем поля силы тяжести.

Высокую степень неоднородности строения земной коры вдоль профиля подчеркивает разрез градиента ОП вдоль профиля (рис. 6, *в*), который показывает насыщенность земной коры субвертикальными плотностными границами, что согласуется с результатами МТЗ (рис. 6, *a*).

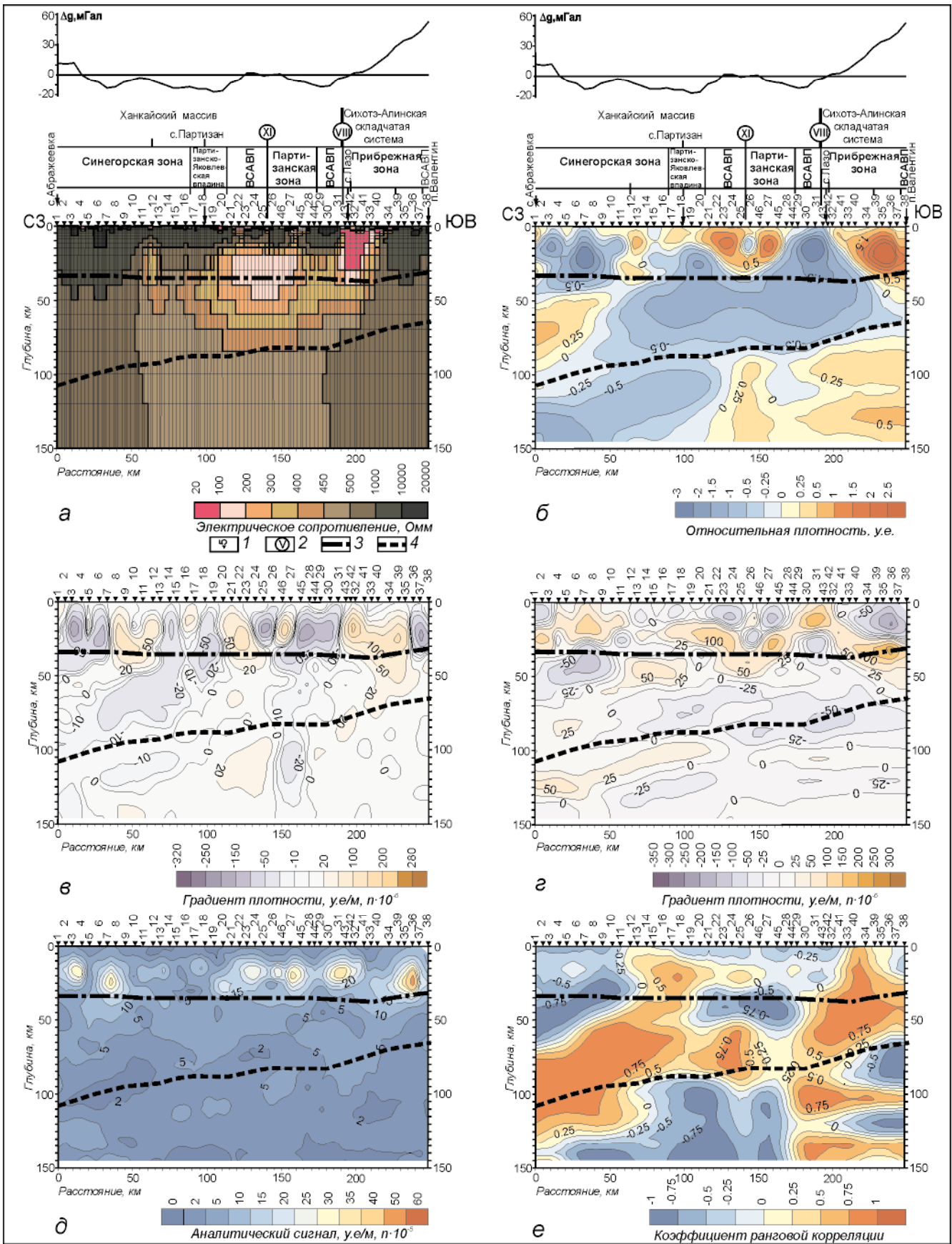
Подошва земной коры, как и на других разрезах, удовлетворительно картируется по уменьшению дифференцированности аналитического сигнала (рис. 6, *д*).

Верхняя мантия на геоэлектрическом разрезе имеет относительно простое строение и характеризуется повышенным ЭС 500–1000 Ом·м под Ханкайским массивом и прибрежной частью САСС. Между ними на глубине 80–150 км располагается область пониженного ЭС 450–500 Ом·м, которое уменьшается с уменьшением глубины и достигает 100–200 Ом·м в подкоровой части верхней мантии.

На профиле наблюдается обширная зона разуплотнения в низах земной коры и в верхней части мантии до глубин примерно 70 км, которая имеет хорошо выраженное падение на запад, что более отчетливо подчеркивается на разрезах, рассчитанных

Рис. 6. Разрезы по профилю с. Абражеевка–п. Валентин (АВ).

a–e, 1–4 – то же, что и на рис. 4.



по относительной плотности параметров (рис. 6, в, г, е). Данное разуплотнение в верхней части мантии пространственно соответствует области развития вулканогенных структур ВСАВП и крупных гранитных интрузий. При этом интенсивное понижение относительной плотности в земной коре наблюдается только в восточной части профиля в районе ЦСАР, где в земной коре имеют место крупные гранитные интрузии. На остальной части преобразованы только низы коры, а на поверхности проявляются вулканогенные структуры и, видимо, небольшие интрузии. Погружение зоны разуплотнения на запад определяет структуру мантии и под Ханкайским массивом, где разуплотнение отмечается только на глубине более 100 км. Плотностная структура коры и верхней мантии в западной части профиля хорошо согласуется с таковой на предыдущих профилях: вертикальный блок со слабо повышенной относительной плотностью в земной коре, переходящий в наклонный и падающий на запад под углом 45° на уровне верхней мантии.

При рассмотрении плотностного разреза верхней мантии, также отмечается наличие слабо выраженных вертикальных плотностных границ, совпадающих с положением на поверхности Партизанского разлома и ЦСАР.

Сопоставление геоэлектрического и плотностного разрезов верхней мантии показывает, что они согласуются между собой лишь в восточной части, где повышенному ЭС соответствует положительные значения ОП под Прибрежной зоной, а низким значениям ЭС соответствуют отрицательные значения ОП в подкоровой части верхней мантии в центральной части разреза. Наклонных структур на геоэлектрическом разрезе, в отличие от плотностного, не наблюдается.

На разрезе КРК (рис. 6, д) отмечается обширная, мощностью около 50 км, область высокой корреляции относительной плотности и электрического сопротивления, расположенная к западу от Партизанского разлома и погружающаяся в западном же направлении с низов земной коры до глубины 70 км. Центральная часть разреза на глубинах 90–140 км, где расположена область пониженного электрического сопротивления 450–500 Ом·м, характеризуется отрицательными коэффициентами корреляции. Прибрежная часть САСС представлена также в основном положительными значениями коэффициента корреляции, но с хорошо проявленной слоистостью, которая отмечалась на плотностном разрезе.

Таким образом, в результате совместной интерпретации геоэлектрических и плотностных данных по профилю АВ подтверждено сложное блоковое строение земной коры южной части Ханкайского массива, определены электрические и плотностные характери-

стики Центрального Сихотэ-Алинского и Партизанского разломов, сделано предположение об их глубинных корнях в мантии. Для Партизанского разлома отмечается его возможное продолжение в мантию, которое делит разрез на западную и восточную части, характеризующиеся различным залеганием слоев. Также показано, что этот разлом является границей, на которой в земной коре имеется встречное падение слоев.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совместный анализ геоэлектрических и плотностных разрезов по трем профилям в южной части Сихотэ-Алинской складчатой системы и сопредельного с ней Ханкайского массива позволил наметить их связи, которые могут быть принципиально объединены в две группы:

- характеризующие особенности глубинного строения изученной территории;
- характеризующие отдельные особенности соотношения и совместной интерпретации двух параметров.

Распределение плотности на разрезах наряду с индивидуальными особенностями имеет в то же время ряд общих черт. Характерна повышенная плотностная дифференциация земной коры по сравнению с мантией, наличие в ней как вертикальных, так и близгоризонтальных плотностных границ. Это наиболее отчетливо видно на разрезах, где показан аналитический сигнал распределения относительной плотности, являющийся аналогом полного градиента. Граница Мохоровичича достаточно точно совпадает с границей его уменьшения, и, в этом смысле, данный параметр может использоваться для оценки глубин границы М в площадном варианте.

В целом геоэлектрические разрезы на уровне земной коры характеризуются высокими ЭС свыше 1000 Ом·м при мощности коры, сопоставимой с мощностью по данным ГСЗ. Земная кора разделена на блоки различной мощности зонами низкого ЭС, которые совпадают в основном с глубинными разломами. В земной коре и подкоровой мантии выделяются области аномально низких ЭС менее 100 Ом·м, природа которых вероятно связана с флюидами, поступающими из верхней мантии.

Верхняя мантия имеет сложное строение, характеризуется наличием областей как пониженного, так и повышенного ЭС, но её строение упрощается при движении с севера на юг. Характерной особенностью геоэлектрических разрезов является наличие в верхней мантии на глубине 80–150 км области повышенного ЭС и неоднородного строения, протягивающейся от побережья в глубь континента.

Применительно к изученным тектоническим единицам отмечается следующее.

Земная кора Ханкайского массива имеет блоковое строение и представлена блоками высокого ЭС, которые имеют как повышенную, так и пониженную плотность. Эти блоки разделены субвертикальными и наклонными зонами низкого ЭС. Повышенной плотностью отмечаются блоки глубокометаморфизованных пород Нахимовской зоны, пониженной – блоки, относящиеся к перекрывающим и «сшивающим» комплексам. Исключение составляет крайняя северная часть массива, где часть профиля, проходящего через Матвеевскую зону, характеризуется пониженной плотностью. Это, вероятно, связано с проходящим здесь Дальнереченским разломом.

Верхняя мантия Ханкайского массива имеет относительно повышенные значения ЭС от 400 до 1000 Ом·м. По данным плотностного моделирования здесь отмечается чередование областей повышенной и пониженной относительной плотности с явно выраженным падением в западном направлении, которое слабо отражено на геоэлектрических разрезах.

На геоэлектрических разрезах в верхней мантии САСС в ряде случаев также проявлено западное падение объектов различного ЭС. Верхняя мантия САСС от подошвы земной коры до глубины 80 км имеет в основном пониженное ЭС 100–300 Ом·м. Мантия на глубинах 80–150 км неоднородна, имеет в целом более высокое ЭС, но осложнена областями более низкого ЭС от 300 до 500 Ом·м, вероятно уходящими на глубину более 150 км. Необходимо отметить понижение относительной плотности на уровне верхней мантии в центральной части всех профилей. Оно прослеживается независимо от знака плотностных неоднородностей на уровне нижней коры и подкоревой мантии и говорит о наличии единой зоны мантийного разуплотнения на уровне 50–100 км. К востоку от нее изученная полоса мантии шириной 30–50 км имеет в целом повышенную плотность. В плотностной модели достаточно отчетливо проявлено наличие в мантии, наряду с вертикальными, наклонных плотностных границ, падающих на запад, в том числе и под Ханкайский массив.

Неоднородность мантии, наличие крупных проводящих блоков и зон разуплотнения, реже уплотнения, связываются с преобразованием мантии в результате процессов субдукции [17, 18, 30]. Области разуплотнения и пониженного электрического сопротивления мантии интерпретируются как области ее преобразования, области движения расплавов и флюидов, выше погружающегося слэба, поступавших в земную кору и формировавших там интрузии. Области повышенной плотности и повышенного электрического

сопротивления – это остатки переработанного слэба. Наличие подобных неоднородностей в надсубдукционном мантийном клине предполагается для ряда современных и палеосубдукционных обстановок как на представительном сейсмическом материале, так и по результатам магнитотеллурических зондирований и плотностного моделирования по гравиметрическим данным [9, 15, 19].

В земной коре САСС на всех трех профилях выделена структура встречного падения блоков высокого ЭС и повышенной плотности северо-восточного простирания, ось которой проходит через пункты № 42–№ 23 (профиль ДП) – № 6–№ 7 (профиль СЗ) – № 25–№ 26 (профиль АВ) под косым углом к ЦСАР. На геологической карте [6] она выделяется как граница, по которой происходит изменение простирания складчатости относительно ЦСАР, срезание и смещение структур. Это подтверждает сдвиговые процессы, происходившие в пределах Южного Сихотэ-Алиня, и согласуется с моделью, предложенной в работах [17, 18, 30].

Совместный анализ электрических и плотностных характеристик по разрезам позволил также установить следующие обобщенные закономерности.

Определены две принципиальные связи соотношения аномалий электропроводности и плотности. *Первая* – когда аномалии электропроводности пространственно совпадают с плотностными неоднородностями и это, очевидно, связано с геологическими телами (блоками) с определенными физическими свойствами. *Вторая* – когда аномалии электропроводности совпадают с границами плотностных неоднородностей, с областями резкого изменения плотности коровых или коро-мантийных блоков и, вероятно, фиксируют данные пограничные области деструкции и флюидонасыщенности земной коры.

В пределах земной коры и верхней мантии выделяются следующие физические неоднородности:

- субвертикальные коро-мантийные петроплотностные границы, совпадающие со сквозными зонами проводимости, интерпретируются как системы крупных разломов;

- зоны повышенного сопротивления в земной коре, совпадающие с зонами пониженной плотности, отвечают областям, насыщенным гранитными интрузиями;

- преимущественно коровые или захватывающие верхи мантии зоны низкого сопротивления, совпадающие иногда с интенсивными зонами разуплотнения, связываются с зонами деструкции и флюидонасыщенности земной коры в областях интенсивного вулканизма;

- относительно пологие границы по электрическому сопротивлению, совпадающие с петроплотностными границами в основном на разных глубинах земной коры, могут быть связаны с невыходящими на поверхность пологими разломами, границами между крупными породными единицами в разрезе, кровельными (подошвенными) областями крупных интрузий;

- зоны повышенного сопротивления, совпадающие с зонами повышенной плотности, вероятней всего фиксируют ареалы базит-ультрабазитового магматизма;

- зоны разуплотнения в верхней мантии, совпадающие с неоднородностями по электрическому сопротивлению, интерпретируются как области преобразования мантийного вещества в надсубдукционном клине, как пути движения расплавов и флюидов.

На разрезах коэффициента ранговой корреляции электрического сопротивления и относительной плотности в мантии достаточно отчетливо выделяются два типа областей: с высоким положительным коэффициентом (более 0.5 и до 0.75), указывающим на хорошую прямую корреляцию, и низким (-0.5-0.75), указывающим на значимую обратную корреляцию. Предварительно можно отметить, что обратная корреляция характерна для областей разуплотнения мантии. Очевидно, что процессы, приведшие к этому, существенно не влияли на электрическое сопротивление.

ВЫВОДЫ

1. В результате совместной интерпретации геоэлектрических и плотностных данных уточнена или получена новая информация о строении земной коры и верхней мантии южной части Сихотэ-Алинской складчатой системы и сопредельного с ней Ханкайского массива, их физических характеристиках. Уточнены границы тектонических блоков, выделены скрытые границы, прослежено их распределение как по латерали, так и на глубину. Подтверждено, что северная часть Ханкайского массива состоит из двух блоков, соответствующих Матвеевской и Малиновской зонам, граница между которыми проходит по Среднеханкайскому разлому.

2. В земной коре выделена структура встречного падения слоев, связанная со сдвиговыми деформациями.

3. Показано различие плотностных и электрических характеристик основных и второстепенных разломов.

4. На всех профилях выделена зона разуплотнения в верхней мантии, связанная предположительно с процессами позднемеловой субдукции.

5. Показано наличие в мантии как вертикальных, так и наклонных плотностных границ, падающих на запад.

6. Намечена граница в верхней мантии, которая разделяет слои с различной плотностной и геоэлектрической структурой.

7. Установлено наличие в верхней мантии на глубинах 80–150 км области повышенного ЭС и неоднородного строения, протягивающейся от побережья в глубь континента.

8. Определены два принципиальных пространственных соотношения аномалий электропроводности и плотности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №16-17-00015 и в рамках государственного задания ИТиГ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.А. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л.: Недра, 1965. 495 с.
2. Баринов Н.Н., Копылков В.Р., Старжинский С.С. О некоторых особенностях глубинного строения юга Главного синклинория и Прибрежной зоны по данным МТЗ (Приморье) // Геология и магматизм Дальнего Востока. Владивосток, 1977. С. 19–22.
3. Брянский Л.И. Плотностная структура земной коры и верхов мантии восточной окраины Азиатского континента. Владивосток: Дальнаука, 1995. 139 с.
4. Врублевский А.А., Копылков В.Р., Приходько В.С. Результаты МТЗ в Южном Сихотэ-Алине // Структурный анализ дислокаций. Хабаровск, 1974. С. 217–225.
5. Глубинное строение Приморья (по данным ГСЗ). М.: Наука, 1976. 92 с.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение) L-(52),53; (K-52,53) оз. Ханка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011.
7. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Лист L-(52), 53; (K-52, 53) оз. Ханка: Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 684 + 8 вкл.
8. Диденко А.Н., Носырев М.Ю. Отражение палео- и современных геодинамических процессов в глубинной структуре Сихотэ-Алинского орогенного пояса // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы IV Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток, 2018. С. 29–32.
9. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 5. С. 701–722.
10. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю г. Спасск-Дальний – бух.Зеркальная по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2018. Т. 37, № 5. С. 31–47.
11. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верх-

- ней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 5. С. 3–13.
12. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю с. Абражеевка–п. Валентин по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2020. Т. 39, № 4. С. (в печати).
 13. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Д». Ч. II. Версия 2008.1 // Российский государственный геологоразведочный университет. М.: РГГУ, 2008. С. 30–31.
 14. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Д». Версия 2018.1. Ч. 1. М.: МГРИ, 2018. 136 с.
 15. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И. и др. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 109–124.
 16. Кулинич Р.Г. Особенности глубинного строения и эндогенная рудоносность мезозой южной части Сихоте-Алиня // Мезозойский тектогенез. Магадан: ДВНЦ АН СССР, 1971. С. 284–287
 17. Мартынов Ю.А., Ханчук А.И. Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований // Петрология. 2013. Т. 21, № 1. С. 84–108.
 18. Мартынов Ю.А., Голозубов В.В., Ханчук А.И. Мантийный диапиризм в зонах конвергенции литосферных плит // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 947–961.
 19. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Камчатки по результатам МТЗ и сейсмотомографии // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 5. С. 44–58.
 20. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Старжинский С.С. Глубинная геоэлектрическая структура и сейсмичность Приморья (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25, № 4. С. 18–25.
 21. 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.
 22. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Шкабарня Г.Н. Геоэлектрическая структура тектоносферы на юге Дальнего Востока: связь с тектоникой, металлогенией, нефтегазоносностью // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения: Материалы Всерос. конф., 12–15 сентября 2011 г., г.Хабаровск / Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилов. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2011. 664 С. 289–293.
 23. Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Дмитриев И.В., Старжинский С.С., Шкабарня Г.Н. Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 54–65.
 24. Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюэли. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3Д» // Вестн. Краунц. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. №16. С. 126–132.
 25. Потапьев С.В. Соотношение поверхностной и глубинной структуры земной коры Приамурья и Приморья // Глубинное строение литосферы Дальневосточного региона (по геофизическим данным). Владивосток, 1980. С. 43–53.
 26. Рейнлиб Э.Л., Романовский Н.П. Интрузивно-купольные структуры Сихотэ-Алиня // Кольцевые и купольные структуры Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 21–26.
 27. Солоха Е.В. Методика и технология обработки и интерпретации геофизических данных в скользящих окнах «живой» формы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 26 с.
 28. Старжинский С.С. О геоэлектрическом разрезе Южного Приморья по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 1983. № 3. С. 88–90.
 29. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края / Очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.
 30. Ханчук А.И., Мартынов Ю.А. Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всерос конф с междунар участием. г. Владивосток, 20–23 сентября 2011 г., Владивосток: Дальнаука, 2011. 457 с. С. 45–49.
 31. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosci. 2014. V. 66. P. 40–53.

*Рекомендована к печати Р.Г. Кулиничем
после доработки 14.05.2020 г.
принята к печати 23.07.2020 г.*

V.B. Kaplun, M.Yu. Nosyrev

Structure of the Earth's crust and upper mantle of the South Sikhote-Alin from magnetotelluric sounding and density modeling

Based on the results of correlation of geoelectric and density sections made on the three-dimensional inversion from three sections located in the South Sikhote-Alin, the distribution regularities were emerged in the electric and density parameters, the relations between them were established, and new data on the structure of the Earth's crust and upper mantle in the region were obtained. An assumption was made of the association of some density and electric inhomogeneity in the upper mantle with the processes of the Late Cretaceous subduction.

Key words: magnetotelluric sounding, density modeling, Earth's crust, upper mantle, Sikhote-Alin, Far East of Russia.