



УДК 550.837

Ю. Ф. Мороз, О. М. Самойлова, Т. А. Мороз

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: morozyf@kscnet.ru*

## Глубинное строение побережья северной Камчатки по геофизическим данным

Рассмотрены методика интерпретации и результаты магнитотеллурического зондирования в комплексе с данными магнитометрии, гравиметрии и другой геолого-геофизической информации. Важное внимание уделяется учёту влияния шифт — эффекта и трехмерного берегового эффекта, изученного в пробных моделях с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля. В качестве основных для интерпретации приняты продольные кривые, в меньшей мере подверженные искажениям в низкочастотной области. Поперечные кривые использованы для уточнения электропроводности верхних частей разреза и выделения разломов. В результате инверсии продольных кривых МТЗ получен геоэлектрический разрез, характеризующий структуру электропроводности осадочно-вулканогенного чехла и подстилающего основания. Земная кора содержит проводящий слой, глубина залегания которого меняется от 30 до 15 км. Обсуждается возможная природа выявленных аномалий электропроводности в земной коре и возможная их связь с рудопроявлениями на дневной поверхности.

### Введение

Район расположен за пределами Тихоокеанской зоны субдукции. Сведения о его глубинном строении представляют повышенный научный интерес. Предполагается, что глубинные геоэлектрические разрезы восточного побережья Северной и Южной Камчатки различны. Данная информация имеет значение для вопросов вулканологии и геодинамики. В последние годы вдоль восточного побережья Северной Камчатки предприятиями ООО «Камчатгеология» и ООО «Северо-Запад» выполнены наблюдения магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования. Эти зондирования в комплексе с площадными электроразведочными исследованиями, выполненными ранее [7, 8], дают возможность уточнить строение осадочно-вулканогенного чехла и получить информацию об электропроводности глубинных частей земной коры.

### Краткая геолого-геофизическая характеристика района

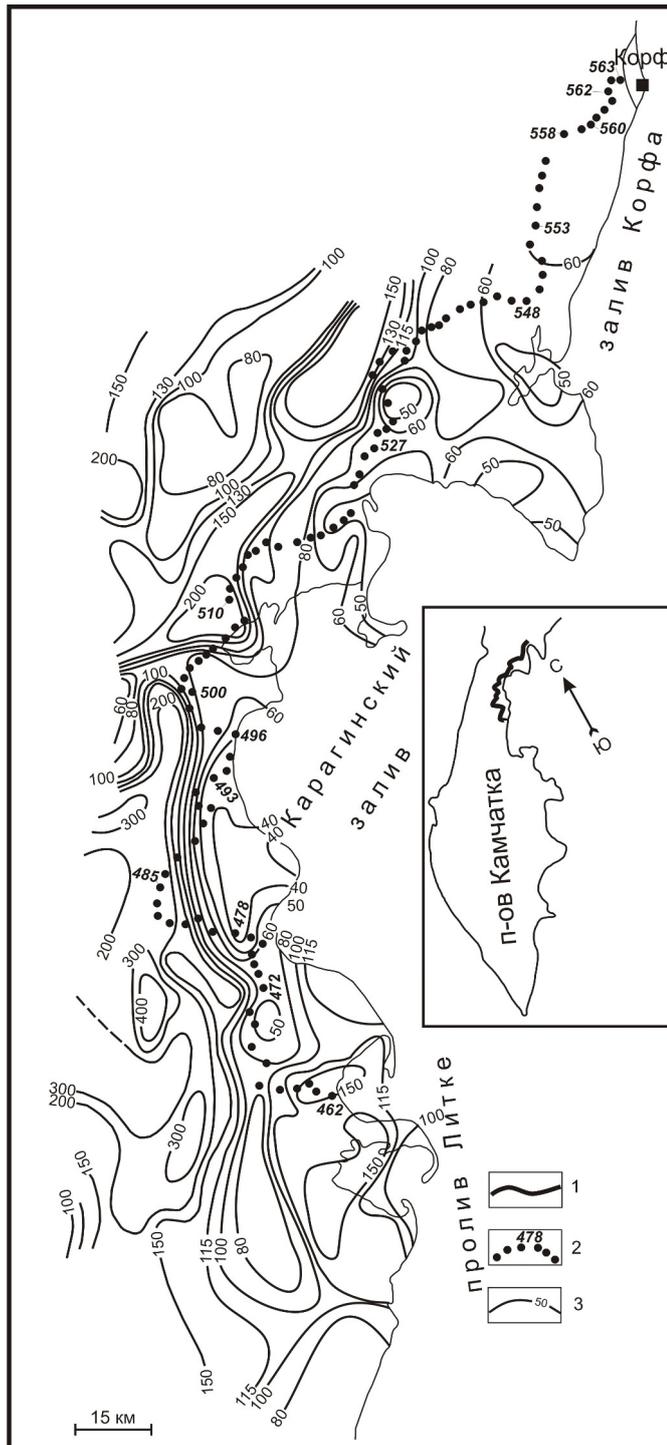
Профиль МТЗ, МВЗ расположен в прибрежной зоне пролива Литке и залива Корф Берингова моря (рис. 1). Район изучен геологической съёмкой [4], мелкомасштабными гравиметровой и магнитной съёмками [11]. Здесь выполнены региональные площадные исследования комплексом методов теллурических токов (ТТ), магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [7, 8]. На Ильпинском п-ове проведены сейсморазведочные работы методом КМПВ. По данным региональных геофизических исследований получено представление о глубинном строении

северо-восточной части Корьякско-Камчатской области [9].

Результаты выполненных исследований дают представление о геологическом строении исследуемой территории. В её пределах развиты, в основном, терригенные, вулканогенно — осадочные и вулканогенные образования третичного и четвертичного возраста. Более древние верхнемеловые породы развиты на юго-восточной оконечности Ильпинского полуострова. В тектоническом плане район исследований расположен в Ильпино-Литкенском прогибе, который является северным продолжением Центрально-Камчатского прогиба. Северо-западной границей прогиба является Камчатско-Корьякский антиклинорий, представляющей собой крупную пологую антиклинальную структуру, по форме близкую к сводовому поднятию, в её пределах докайнозойские породы местами выделены отдельными блоками. На юго-востоке прогиб ограничен Восточно-Камчатским антиклинорием, который прослеживается на п-ове Озерном и п-ове Карагинском и имеет продолжение на севере на п-ове Тайгонос [4]. По сейсмологическим данным к юго-восточной границе прогиба приурочен Корьякский сейсмический пояс, который образует границу плиты Берингии [6].

### Методика работ и интерпретации данных

МТЗ и МВЗ выполнены по профилю с шагом 2–5 км. Регистрация магнитотеллурического поля осуществлялась в диапазоне периодов 0,0025–1000 с с помощью станций MTU-5A производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Для реги-



**Рис. 1.** Схема средней напряженности теллурического поля и расположения профиля МТЗ. 1 — профиль МТЗ, показанный на вставке; 2 — пункты МТЗ, 3 — изолинии средней напряженности теллурического поля.

станции электротеллурического поля использована пятиэлектродная крестообразная измерительная установка, заземлённая слабополяризуемыми электродами. Длина электрических линий 80 м., азимут их  $30^\circ$  и  $120^\circ$ , горизонтальные магнитные

датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землёй. Вертикальные датчики зарывались в землю, а в условиях каменистой почвы устанавливались на треноге. Измерения МТ-поля осуществлялись несколькими станциями МТУ-5, разнесёнными на необходимое расстояние. Для подавления промышленных помех использована методика синхронных измерений с использованием удалённой базовой станции. На участках профиля с низким уровнем промышленных помех в качестве базовой станции использовалась станция на одной из точек профиля. Обработка магнитотеллурических данных выполнена предприятием «Северо-Запад» с помощью специальных программ. В результате обработки получены тензоры импеданса и магнитного типпера в диапазоне периодов от 0,0025 до 1000 с и более. Точность определения модулей магнитотеллурических параметров составляет первые проценты, фаз импеданса — первые градусы.

Тензор импеданса даёт возможность оценить характер и степень геоэлектрической неоднородности среды. Анализ выполнен с помощью полярных диаграмм импеданса [2], параметра неоднородности [14] и параметра асимметрии [15]. Параметр неоднородности имеет значения первые десятые доли на коротких периодах. На длинных периодах указанный параметр возрастает, что связано с влиянием крупных структур. Параметр асимметрии [15] свидетельствует о том, что на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с вытянутостью прогиба в северо-восточном направлении. В основу интерпретации приняты кривые, полученные в главных направлениях. Они в большинстве случаев ориентированы по простиранию и вкрест простирания основных структурных зон. В дальнейшем эти кривые будем называть продольными и поперечными. Анализ амплитудных и фазовых кривых свидетельствует о существовании дисперсионных соотношений между ними. Это даёт возможность использовать их для совместной интерпретации.

Форма кривых МТЗ отвечает определенному типу геоэлектрического разреза. Следовательно, кривые МТЗ, близкие по своей форме, отражают сходный глубинный геоэлектрический разрез. Этот принцип положен в основу получения обобщенных глубинных геоэлектрических разрезов по профилю МТЗ. Организовав кривые МТЗ, близкие по своей форме в семейства, мы тем самым выделим на профиле районы с различным типом глубинного геоэлектрического разреза.

Первоначально на профиле таких районов было выделено 18. Каждый из них характеризуется своей формой продольных и поперечных кривых. Анализ показывает, что в большинстве случаев амплитудные кривые, сохраняя свою форму, сильно расходятся по уровню сопротивлений. В то же время

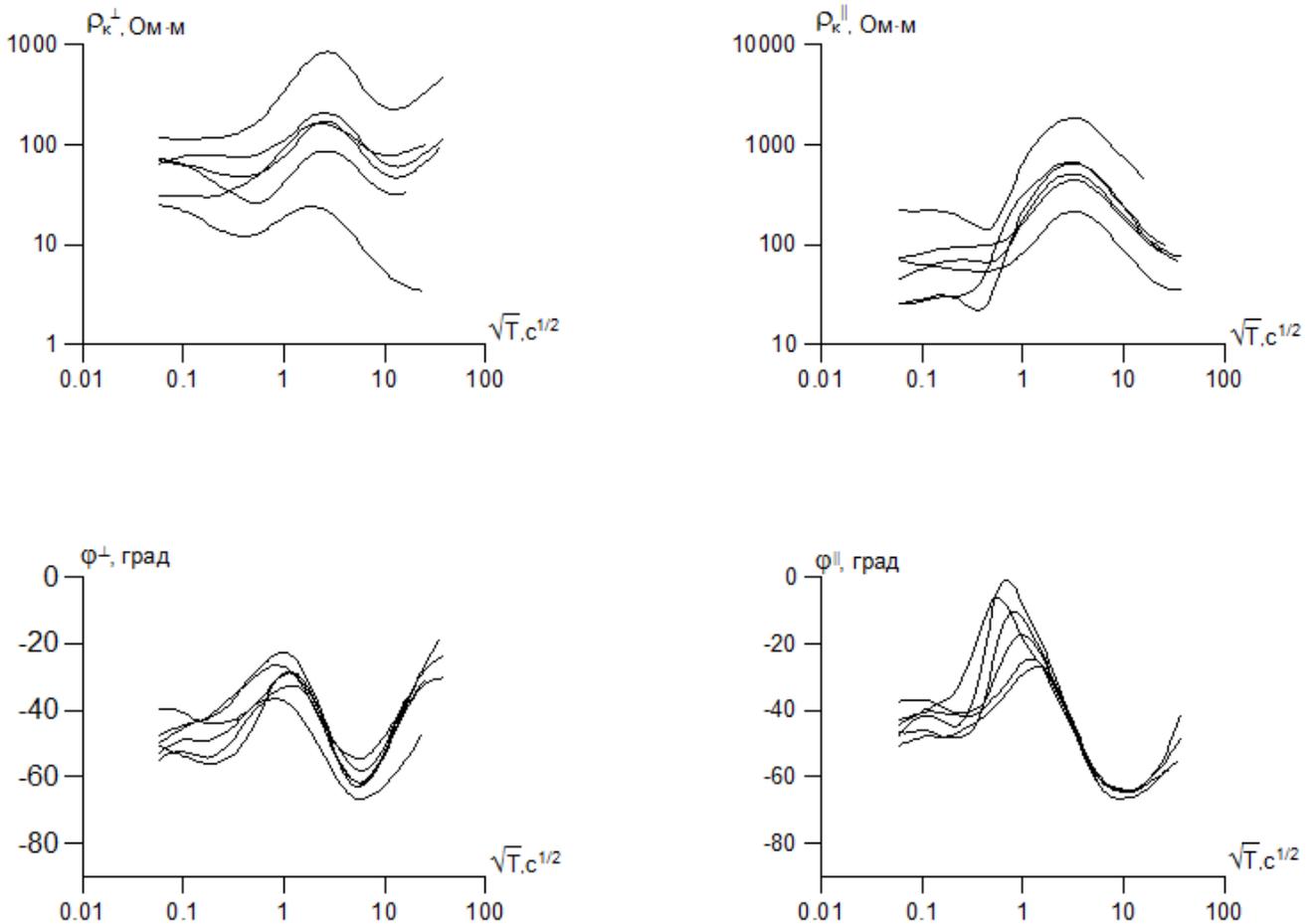


Рис. 2. Семейство амплитудных и фазовых кривых для первого района профиля МТЗ.

фазовые кривые расходятся между собой незначительно. Это хорошо видно на рис. 2, где в качестве примера приведено семейство амплитудных и фазовых кривых для одного из районов профиля (МТЗ 462–468). Амплитудные кривые расходятся по уровню сопротивлений в низкочастотной области почти на порядок, а фазовые кривые близки, что свидетельствует о влиянии эффекта  $r$  (статический сдвиг амплитудных кривых). Эффект связан с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей. Для его ослабления выполнено конформное осреднение амплитудных и фазовых продольных и поперечных кривых МТЗ.

Полученные из семейств средние продольные и поперечные амплитудные кривые кажущегося электрического сопротивления и фазовые кривые импеданса изображены на рис. 3. Районы, для которых получены указанные кривые показаны на рис. 4а. Следует отметить, что кривые в низкочастотной области не свободны от влияния структур приповерхностных частей земной коры. Поэтому, для изучения глубинной электропроводности принята ещё попытка организации полученных средних кривых в семейства близкие по своей форме. Таких семейств организовано восемь. Они соответствуют зонам на профиле, приведённым на

рис. 4б. Для зон рассчитаны средние кривые из семейства кривых. Полученные средние продольные и поперечные амплитудные кривые кажущегося электрического сопротивления и фазовые кривые импеданса представлены на рис. 5. Кривые различаются по форме, что связано с геоэлектрической неоднородностью среды. Большинство кривых имеют в левой части минимум, отражающий наличие осадочно-вулканогенного чехла пониженного электрического сопротивления. В большей мере минимумы выражены во впадинах, выполненных преимущественно терригенными осадочными отложениями. Максимумы в средней части кривых МТЗ обусловлены слоем земной коры повышенного электрического сопротивления. Большинство кривых в правой части представлены минимумом или нисходящей ветвью, которые могут быть связаны как с глубинным проводящим слоем, так и с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в Беринговом и в Охотском морях. Поэтому, с помощью численного трёхмерного моделирования изучен береговой эффект в пробных моделях.

Результаты моделирования показали, что кривые МТЗ до периода 100 с практически не подвержены влиянию берегового эффекта. Однако в низкочастот-

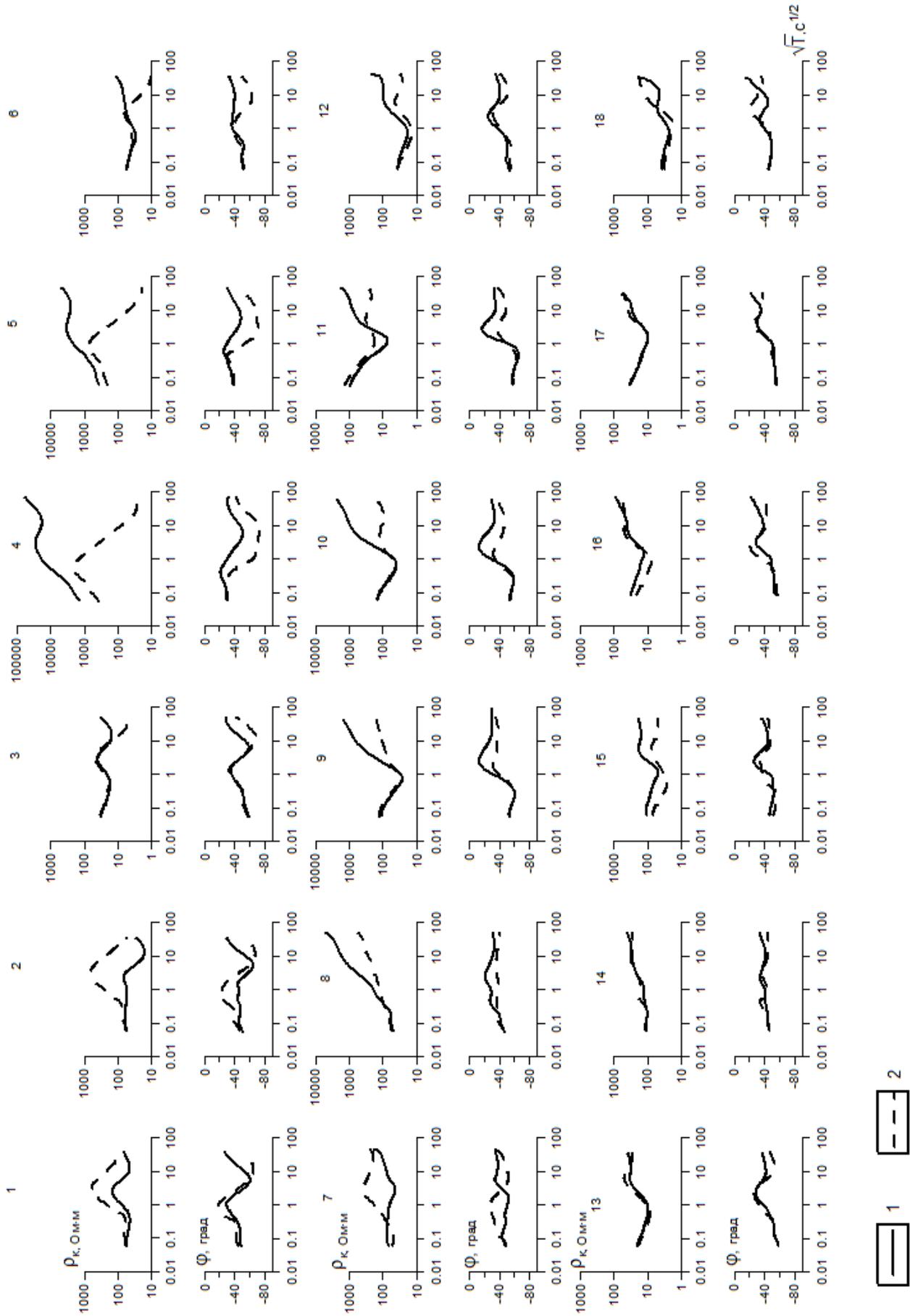


Рис. 3. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ по районам профиля. 1 — поперечные, 2 — продольные.

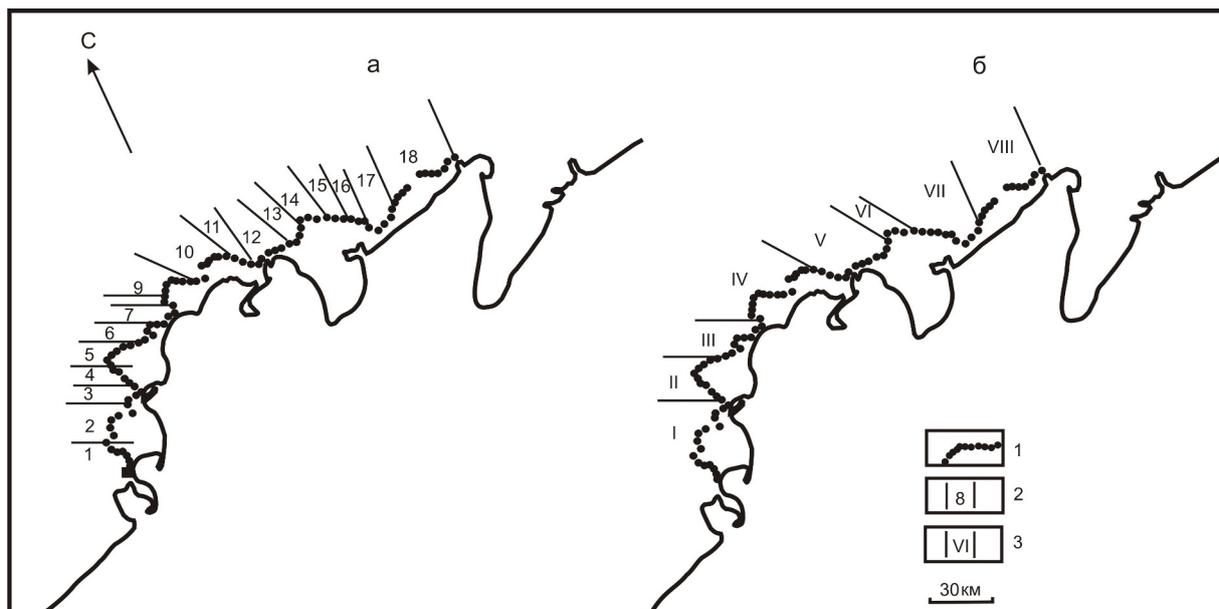


Рис. 4. Схема расположения районов (а) и зон (б), для которых получены средние кривые МТЗ. 1 — пункты МТЗ; 2 — районы; 3 — зоны.

ной области продольные кривые могут дать только приближенную информацию о глубине залегания литосферного проводящего слоя с точностью в первые десятки процентов.

#### Геоэлектрический разрез земной коры по профилю МТЗ

В результате интерпретации кривых МТЗ составлен глубинный геоэлектрический разрез, представленный на рис. 6. Здесь приведены графики поля силы тяжести и магнитного поля. На геоэлектрическом разрезе показаны разломы по геолого-геофизическим данным, рудопроявления и выходы минерализованных вод [5]. В геоэлектрическом разрезе верхних частей земной коры выражены структуры Лесновско-Ватынского антиклинория и Ильпино-Литкенского прогиба, разделенные глубинным разломом, выделенным по геофизическим данным. Лесновско-Ватынский антиклинорий, судя по карте средней напряженности теллурического поля, был пересечен профилем МТЗ дважды. Глубинный разлом выделен по полосе сильного градиента напряженности теллурического поля и интенсивным аномалиям гравитационного и магнитного полей.

Лесновско-Ватынский антиклинорий характеризуется сложным строением. Структура верхних частей земной коры выражена в виде блоков с различной электропроводностью. Блоки ограничены тектоническими нарушениями, выделенными по геофизическим данным. Они находят отражение в геофизических полях. Блоки повышенного электрического сопротивления характеризуются повышенной интенсивностью гравитационного и магнитного полей, что свидетельствует о насыщенности разреза магматическими породами. Блоки с относительно повышенной электропроводностью отличаются сла-

бой интенсивностью магнитного поля и пониженной напряженностью поля силы тяжести, что можно объяснить преобладанием в блоках терригенных толщ или повышенной пористостью вулканогенных слабомагнитных пород, насыщенных минерализованными водами.

Ильпино-Литкенский прогиб является северным продолжением Центрально-Камчатского прогиба. Границы его — Центрально-Камчатский и Восточно-Камчатский антиклинорий, последний из которых прослеживается на п-ове Озерном и о-ве Тайгонос [4]. Северо-западная граница прогиба, как мы уже отмечали, достаточно четко обнаруживается по аномально-высоким градиентам напряженности теллурического поля, связываемых с тектоническим осложнением. Значительная часть прогиба скрыта водами Берингова моря. Мощность кайнозойских отложений, слагающих северо-западный борт прогиба, меняется от 1,5 до 3 км при соответствующем изменении их среднего продольного электрического сопротивления от 10 до 250 Ом·м. В теллурическом и гравитационном полях прогиб выражен аномалиями пониженной интенсивности. В магнитном поле проявились положительные и отрицательные аномалии, свидетельствующие о наличии в разрезе вулканогенных образований. Наряду с этим отмечаются интенсивные возмущенные аномальные изменения магнитного, гравитационного и теллурического полей, отражающие наличие разломов.

Профилем МТЗ пересечены структуры прогиба, выявленные по опорному высокоомному геоэлектрическому горизонту, отождествляемому с докайнозойским комплексом пород. К ним относятся: Тымлатское поднятие, Анапкинская впадина, Ильпинское поднятие и Вывенская впадина.

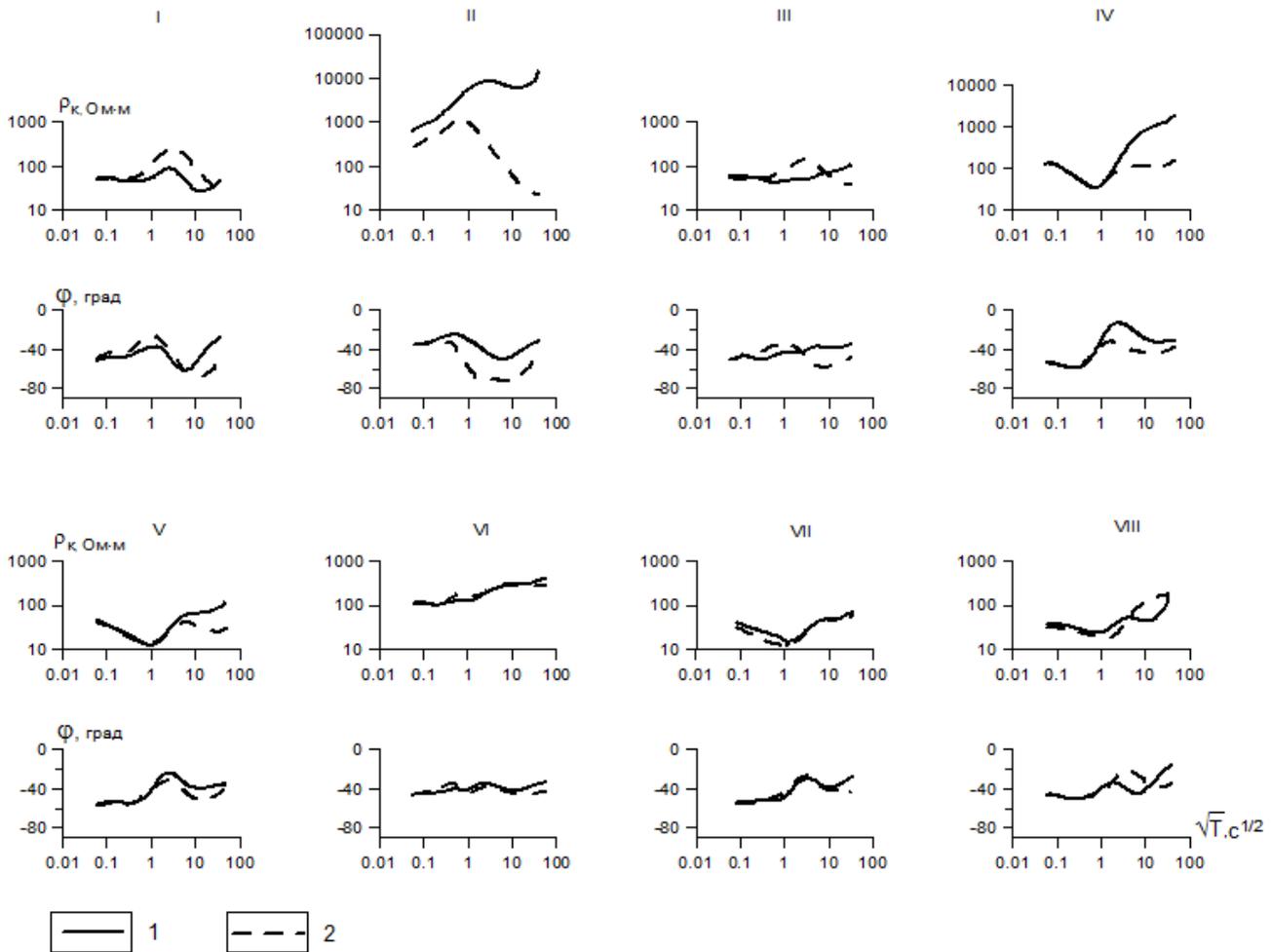


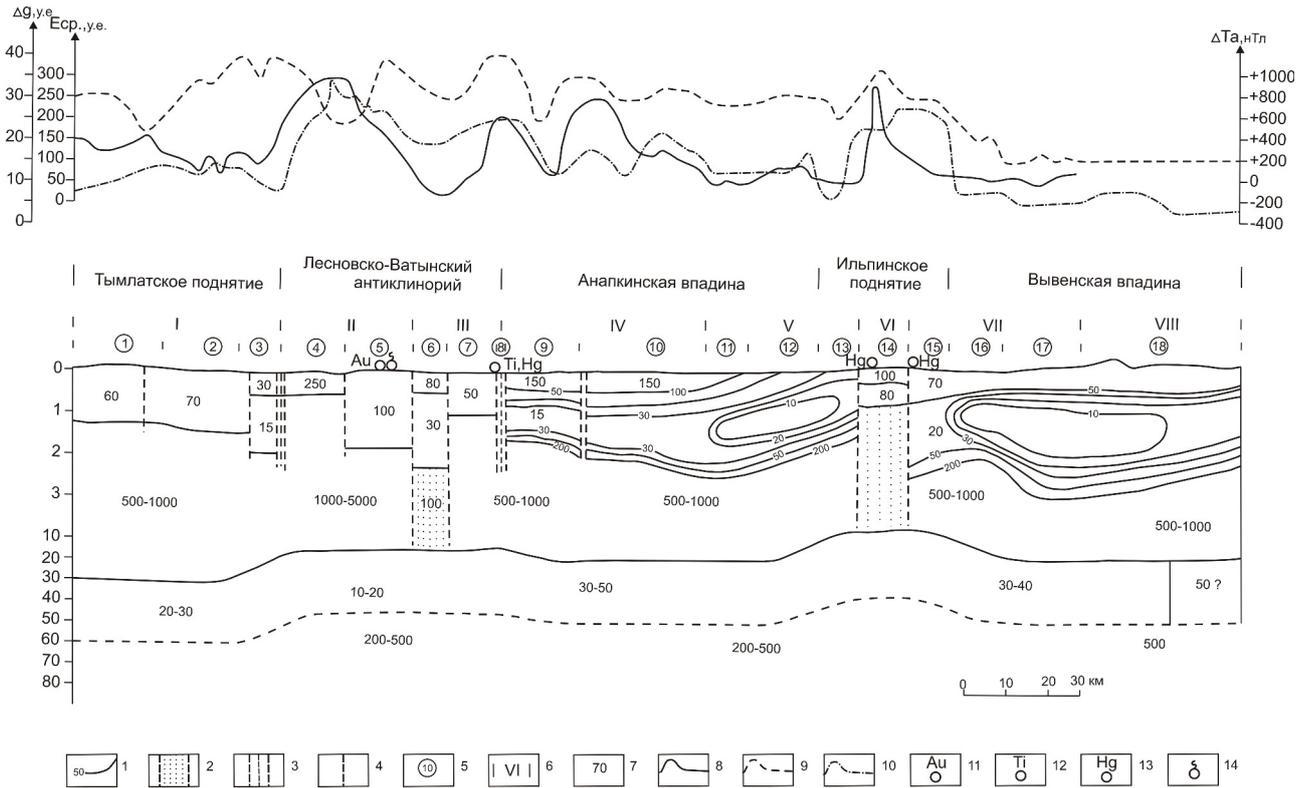
Рис. 5. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ по зонам профиля. 1 — поперечные, 2 — продольные.

Тымлатское поднятие характеризуется преимущественно увеличенным удельным электрическим сопротивлением кайнозойской толщи, составляющим 60 – 70 Ом·м. В зоне глубинного разлома на границе Лесновско-Ватынского антиклинория удельное электрическое сопротивление понижается до 15 – 30 Ом·м. Повышенное электрическое сопротивление в районе поднятия, по-видимому, связано с присутствием в кайнозойской толще вулканогенных образований. На это указывает повышенная интенсивность отрицательного магнитного поля и повышенная напряжённость гравитационного поля, а также интрузии четвертичного и неогенового возрастов, закартированные геологической съёмкой на дневной поверхности. Повышенная электропроводность кайнозойской толщи в зоне глубинного разлома можно объяснить присутствием в разрезе терригенных пород или вулканогенных образований повышенной пористости, насыщенных минерализованными растворами. Толща повышенной электропроводности характеризуется аномалией пониженной напряжённости теллурического и гравитационного полей. Здесь магнитное поле выражено интенсивной аномалией отрицательного магнитного поля, что связывается

с присутствием в разрезе вулканогенных пород с повышенной магнитной восприимчивостью.

Анапкинская впадина характеризуется повышенной электропроводностью осадочно-вулканогенного чехла, в разрезе которого преобладают терригенные породы с удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом·м. Мощность кайнозойской толщи во впадине меняются от 1,5 до 3 км. В юго-западной части впадины выделяется разлом, вероятно, насыщенный магматическими породами. Разлом выявлен по эффекту расхождения кривых МТЗ. Он находит отражение в повышенной напряжённости теллурического, гравитационного и магнитного полей. Анапкинская впадина в северо-восточной части отличается спокойным поведением геофизических полей, что свидетельствует о слабой насыщенности разреза вулканогенными образованиями.

Ильпинское поднятие характеризуется повышенным удельным электрическим сопротивлением осадочно-вулканогенного чехла за счёт насыщенности разреза вулканогенными образованиями. В средней части поднятия выделяется приподнятый блок, ограниченный разломами. Он сложен толщей пород, включающих интрузивные и эффузивные магмати-



**Рис. 6.** Глубинный геоэлектрический разрез. 1 — изолинии удельного электрического сопротивления, в Ом·м; 2 — зоны повышенной проницаемости; 3 — зоны глубинных разломов; 4 — разломы; 5 — районы, выделенные после первого этапа осреднения; 6 — зоны, выделенные после второго этапа осреднения; 7 — удельное электрическое сопротивление в Ом·м; 8 — график средней напряженности теллурического поля; 9 — график поля силы тяжести; 10 — график магнитного поля; 11 — проявления золота; 12 — проявления титана; 13 — проявления ртути; 14 — естественные проявления подземных пресных вод (источники).

ческие образования. Это отражается в аномальном поведении теллурического, магнитного и гравитационного полей. На дневной поверхности в районе данного блока закартированы выходы диоритов и габбро-диоритов неогенового возраста.

Вывенская впадина сложена кайнозойскими породами с удельным электрическим сопротивлением 10–50 Ом·м. Повышенная проводимость осадочного чехла впадины обусловлена преобладанием в разрезе терригенных пород, обладающих повышенной пористостью и насыщенных минерализованными водами. Впадина отличается спокойным поведением гравитационного, магнитного и теллурического полей. Отрицательный уровень магнитного поля впадины свидетельствует о наличии в верхней части разреза вулканогенных образований.

В литосфере выделен слой повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. Мощность слоя приблизительно оценивается в 30 км. Однозначно можно судить лишь о поведении кровли слоя. Она максимально приподнята под Лесновско-Ватынским антиклинорием и Ильпинским поднятием. Здесь глубина кровли располагается на глубине примерно 15 км и 5 км. В юго-западном направлении, под Тымлатским поднятием, глубина кровли погружается

до 30 км. Под Анапкинской впадиной, Ильпинским поднятием и юго-западной частью Вывенской впадины глубина кровли слоя составляет около 20 км. В северо-восточной части Вывенской впадины проводящий слой в явной форме на кривых не выражен. Возможно, в этой части впадины, проводящий литосферный слой отсутствует. Однако не исключено, что здесь удельное электрическое сопротивление слоя заметно возрастает и поэтому, он не проявился на кривых МТЗ. На разрезе изображён последний вариант, где удельное электрическое сопротивление слоя указывается в 50 Ом·м под знаком вопроса.

Природу литосферного проводящего слоя сопротивлением в первые десятки Ом·м можно связать с наличием высокоминерализованных растворов, а также с электропроводящими сульфидными образованиями. Согласно [11], региональный тепловой поток в районе профиля оценивается в 80 мВт/м<sup>2</sup>. По данному тепловому потоку температуры на глубинах 20–30 км составляют 500–600°С. Как известно, многие породообразующие минералы в составе пород земной коры могут содержать кристаллизационную воду или группу ОН (слюды, хлорит, роговая обманка, амфиболит и т. д.). Так, например, породы фации зелёных сланцев содержат до 4%, амфиболитовой — 1–2%, гранулитовой — 0,35% [1, 13]. В ре-

зультате регионального метаморфизма при температурах 400–800° С протекают процессы дегидратации и, выделяется вода, которая занимает межгранулярное пространство, образуящееся за счёт уплотнения минералов после выделения воды. При высоких давлениях и температурах вода обладает высокой растворяющей способностью, что приводит к образованию высокоминерализованных растворов, существующих при высоких температурах [10]. Обогащение пород жидким электролитом приводит к резкому уменьшению электрического сопротивления на несколько порядков. Грубые оценки показывают, что достаточно сотых-десятых долей процента относительно объёма флюида в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшения сопротивления горной пород до первых десятков — единиц Ом·м [3]. Можно предполагать, что одной из причин возникновения литосферного слоя является наличие жидкой фазы. Также не исключено, что в отдельных частях проводящего слоя определённую роль играют скопления электропроводящих минералов.

На геоэлектрическом разрезе показаны известные рудопроявления и выходы минерализованных источников в районе профиля МТЗ (рис. 6). Рудопроявления золота, титана и ртути приурочены к Лесновско-Ватынскому синклинорию и Ильпинскому поднятию. Как было отмечено выше, в районе этих структур литосферный проводящий слой поднимается до глубины 15 и 5 км. Здесь, в земной коре (район 6 и 14) между осадочно-вулканогенным чехлом и глубинным проводящим слоем выделяются зоны с пониженным удельным электрическим сопротивлением в 100 Ом·м, связанные, по-видимому, с повышенной проницаемостью пород, содержащих жидкие флюиды. По данным зонам гидротермальные растворы и магматические расплавы могут проникать в осадочно-вулканогенный чехол. Высокоминерализованные растворы, поднимаясь вверх, охлаждаются и из них выделяются различные рудные компоненты, заполняющие трещины в горных породах. В результате этого в зонах наиболее активного влияния гидротермальных растворов и магматических расплавов в приповерхностных частях разреза образуются рудные узлы. В таких зонах, сложенных вулканогенными породами, рудные компоненты часто не образуют связанных каналов. Поэтому, они в верхних частях земной коры характеризуются повышенным электрическим сопротивлением. Блоки вулканогенных пород отличаются повышенной плотностью. Это находит отражение в виде аномалий повышенной напряжённости гравитационного поля и аномалий возмущённого магнитного поля (районы 5 и 14).

Выявленная связь глубин залегания литосферного проводящего слоя, геоэлектрических неоднородностей, осадочно-вулканогенного чехла и геофизических полей с размещением рудопоявлений цветных и благородных металлов на поверхности представляет важный критерий прогноза рудных

месторождений. Наибольший интерес представляют районы, где литосферный проводящий слой приближен к дневной поверхности и геоэлектрические неоднородности верхних частей земной коры, характеризуются аномальным поведением гравитационного и магнитного полей. Данный критерий может служить дополнительным признаком для выявления рудных месторождений на региональном и поисковом этапах исследований.

#### Список литературы

1. Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. М.: Наука. 1986. 124 с.
2. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Научный мир. 2009. С. 677.
3. Ваньян Л. Л., Хайдман Р. Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Изд. Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
4. Геология СССР. Том. 31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.
5. Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб: 500 000/ под ред. Литвинова А. Ф., Патоки М. Г., Марковского Б. А. СПб: ВСЕГЕИ, 1999
6. Ландер А. В., Левина В. И., Иванова Е. И. Сейсмическая история Корякского нагорья и афтершоковый процесс Олюторского землетрясения 20(21) апреля 2006 г. *Mw* 7,6. // Вулканология и сейсмология. 2010. № 2. С. 16–30.
7. Мороз Ю. Ф. Результаты исследований Восточной Камчатки комплексом методов электроразведки ТТ, МТЗ, ВЭЗ // Геология и геофизика. 1976. № 10. С. 140–144.
8. Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
9. Нурмухамедов А. Г., Мороз Ю. Ф. Глубинное строение северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным региональных геофизических исследований // Геофизический журнал. 2009. № 3. Том. 31. С. 1–10.
10. Равич М. И. Фазовые равновесия в некоторых водосолевых системах при повышенных температурах и давлениях // Экспериментальное моделирование природных процессов. М.: Наука. 1971. С. 112–118.
11. Ривови Л. А. Геомагнитная характеристика главных тектонических структур востока СССР переходной зоны от Азиатского континента к Тихому океану и абиссального дна последнего // Геология и геофизика. 1964. № 5. С. 38–51.
12. Смирнов Я. Б., Сугробов В. М. Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 16–31.
13. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир. 1981, 435 с.
14. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. *J. Geophysics*. 1988. № 62. P. 119–127.
15. Swift C. M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, M/T. Cambridge. 1967.