



УДК 550.837

Ю. Ф. Мороз, О. М. Самойлова

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

Магнитовариационные исследования восточного побережья северной Камчатки

В работе внимание акцентируется на изучении глубинной электропроводности среды в условиях сильного влияния берегового эффекта на магнитовариационные зондирования. Для этого экспериментальные данные, полученные на северо-восточном побережье, сопоставлены с результатами трехмерного численного моделирования в виде схем индукционных стрелок. Сравнительный анализ, проведенный для периодов вариаций 100 с. и 1000 с., показывает степень искажения индукционных стрелок. В пробную модель введен проводящий слой на глубине от 30 до 50 км, существование которого «гасит» действие берегового эффекта.

Введение

Глубинное строение Камчатского перешейка изучено с помощью различных геофизических методов, в том числе и электроразведочных, ещё во второй половине XX в., когда довольно большая территория была покрыта сетью пунктов МТЗ, ТТ и ВЭЗ. Однако эти работы, результаты которых рассмотрены в публикациях [2–4, 6, 7], в основном проводились на удалении от акваторий, что позволило избежать сложностей, связанных с береговым эффектом, и что привело к дефициту информации о глубинной электропроводности в области перехода океан-континент. В последние годы компанией ООО «Северо-Запад» выполнены работы по МТЗ и МВЗ на северо-восточном побережье Камчатки. Исследуемый профиль имеет протяжённость 300 км. Он проходит от п. Оссора до п. Корф вдоль нескольких заливов и Ильпинского полуострова. Таким образом, к данным, полученным по указанному профилю, необходимо применить методику, учитывающую влияние берегового эффекта, чему посвящается настоящая статья.

Краткая геолого-геофизическая характеристика района

В региональном плане изучаемый профиль расположен в Восточно-Камчатской складчато-блоковой зоне, отделяющейся от Западно-Камчатского прогиба шовной областью Главного камчатского глубинного разлома. В пределах этой зоны развиты, в основном, терригенные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные образования третичного и четвертичного возраста. Более древние верхнемеловые породы развиты на юго-восточной оконечности Ильпинского полуострова.

Основная структура, участвующая в строении района работ — Ильпино-Литкенский прогиб (рис. 1), в котором общая мощность осадочного комплек-

са по данным гравиметрии составляет 3–6 тысяч метров. Прогиб характеризуется относительно пониженным уровнем гравитационного и магнитного полей. Его строение асимметричное, при котором ось смещена в сторону Вывенского глубинного разлома, наиболее приподнятая часть расположена на п-ве Ильпинском (Северо-Ильпинское поднятие), а наиболее погруженные части совпадают с границами Вывенской и Кичигинской впадин. Северо-Ильпинскому поднятию отвечают повышенные значения гравитационного поля и отрицательное магнитное поле. Есть несколько положительных аномалий в пределах данной структуры, фиксирующие экстрезии дацитов и субинтрузии диоритов плиоценового возраста. Выходам на дневную поверхность древних отложений соответствуют относительные максимумы гравитационного поля, выходам более молодых пород — относительные минимумы поля силы тяжести. По материалам КМПВ общая мощность осадочной толщи приравнивается к 3380 м. Вывенская впадина охватывает северо-восточную часть Ильпинского п-ва и выполнена преимущественно терригенными палеоген-неогеновыми отложениями. По побережью залива Корфа от полуострова в северо-восточном направлении протягивается Корфская антиклинальная зона. На гравиметрической карте в пределах Кичигинского залива выделяется крупный и интенсивный относительный минимум северо-восточного простирания, обозначающий Кичигинскую впадину, которая простирается от р. Верояам до р. Тымлат. Большая часть этой отрицательной структуры находится под водами пролива Литке. В районе северо-западного борта впадины, проходящего по побережью Кичигинского залива, широко распространены вулканогенные образования. Отложения слабо дислоцированы и образуют ряд складок северо-восточного и субмеридионального простирания. Мощность осадков, выполняю-

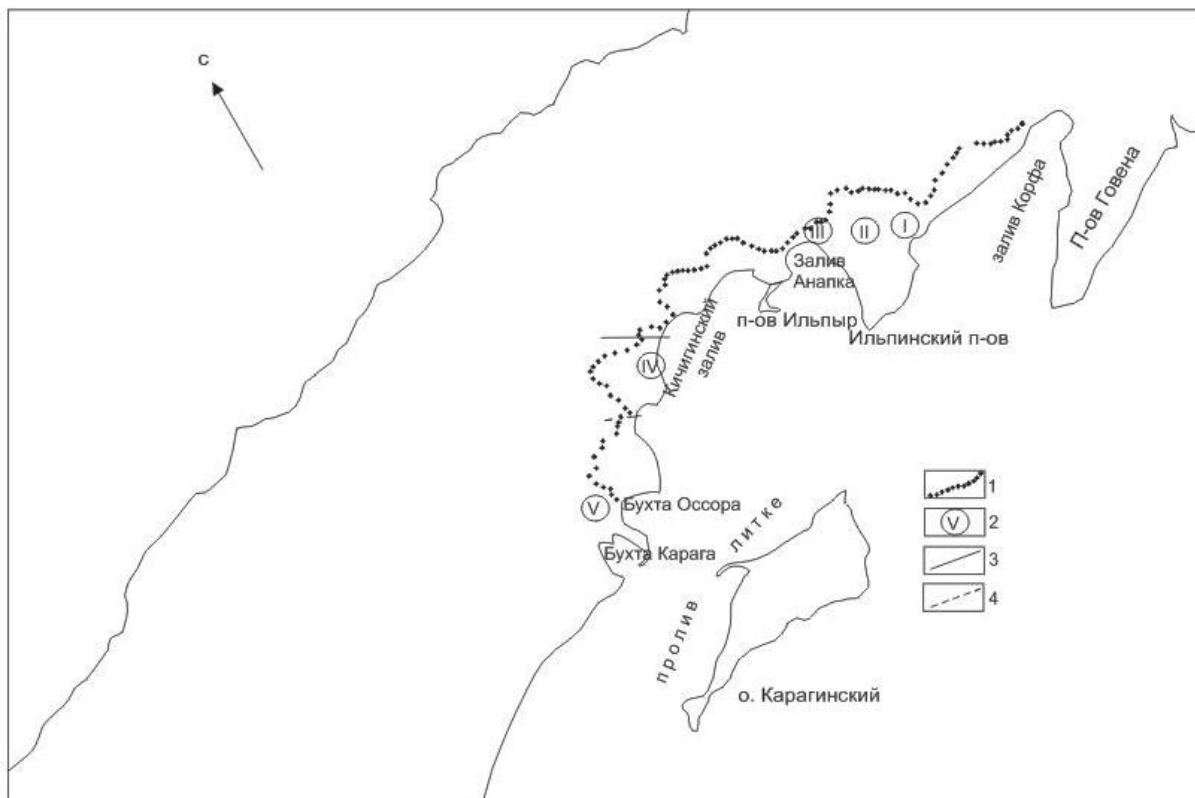


Рис. 1. Схема расположения профиля МТЗ. 1 — пункты МТЗ; 2 — структуры по данным электроразведки [4]: I — Вывенская впадина, II — Ильпинское поднятие, III — Валахыльско-Альховаямская впадина, IV — Кичигинская впадина, V — Тымлатское поднятие; 3 — глубинные разломы [2]; 4 — тектонические нарушения [2].

щих Кичигинскую впадину, достигает 3000 м. С юга к ней примыкает Тымлатское поднятие, которое в основном скрыто водами Берингова моря. На севере эта область ограничивается глубинным поперечным разломом. Северо-западное крыло поднятия является высокоомным в сравнении с Ильпинской структурой, что обусловлено значительной насыщенностью разреза вулканогенным материалом. На поверхности залегают рыхлые четвертичные образования, среди которых обнажаются олигоценные осадочные породы, смятые в складки северо-восточного простирания. Ильпино-Литкенский прогиб включает в себя Валахыльскую впадину, охватывающую заливы Анапка и Чала и имеющую основное простирание под водами пролива Литке. Структура характеризуется слабоотрицательным магнитным полем, но не находит достаточно четкого отражения в наблюдаемом поле силы тяжести. Борт впадины соответствует области развития молодых миоцен-плиоценовых отложений [2].

Геоэлектрический разрез района работ, о котором говорят данные ранее выполненных исследований методами МТЗ и ВЭЗ (вертикальное электрическое зондирование), является довольно сложным. Суммарная продольная проводимость кайнозойских отложений мощностью до 3–4 км варьируется в пределах от 300–400 Сим до 5–10 Сим. Повышенные значения сопротивлений характерны для Тымлат-

ского поднятия. Отрицательные структуры, выполненные терригенными образованиями, обладают повышенной электропроводностью. Методами электроразведки ранее изучен докайнозойский комплекс, включающий верхнемеловую терригенную толщу, обладающую перспективами на нефть и газ. Также в районах, расположенных на удалении от профиля изучен докайнозойский комплекс, перекрытый чехлом палеоген-неогеновых отложений, где верхнемеловые породы местами выходят на дневную поверхность. В пределах Лесновской площади и Тигильского поднятия исследована структура поверхности метаморфизованного фундамента и оценена мощность мезокайнозойских отложений для наиболее крупных поднятий меловых пород. Для Тигильского поднятия установлено в общих чертах соответствие структурных планов докайнозойского основания и фундамента. В пределах Лесновской площади наиболее приподнятым блокам верхнемеловых терригенных пород отвечает прогиб по фундаменту глубиной 4–5 км. Данная структура, вероятно, представляет собой часть меловой геосинклинали, испытавшей подъем в кайнозойское время. Аномалии пониженного теллурического и гравитационного полей, отмеченные над выходами терригенных пород лесновской серии, не могут быть объяснены только уменьшением их сопротивления и плотности. Данные МТЗ свидетельствуют об ослабленной зоне

(глубинном разломе), с которой может быть связан выделенный в земной коре проводящий, разуплотненный слой на глубинах 10–15 км [3].

Методика работ

Наблюдения магнитного поля выполнены с помощью аппаратуры канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Измерения поля осуществлялись несколькими станциями МТУ, разнесенными друг от друга на определенное расстояние. Горизонтальные магнитные датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землёй. Они ориентировались по азимутам 30° (E_y) и 120° (E_x). При наличии промышленных помех для повышения качества измерений применялась методика синхронных измерений с использованием удалённой базовой станции. На участках профиля с низким уровнем промышленных помех в качестве базовой использовалась одна из точек профиля. Обработка первичных магнитовариационных данных выполнена предприятием ООО «Северо-Запад» с помощью специальных программ. Важное внимание уделялось редакции результатов по устранению влияния «отскоков» значений магнитотеллурических параметров, связанных с промышленными, ветровыми помехами и влиянием гроз. В результате обработки получены компоненты индукционной матрицы в диапазоне периодов от 0,0001 до 1000 с и более.

Интерпретация магнитовариационных зондирований

В основе магнитовариационных зондирований лежит связь между горизонтальной и вертикальной составляющей геомагнитного поля, которая выражается через индукционную матрицу или, как её по-другому называют, магнитный типпер [1]:

$$H_Z = \hat{W} \mathbf{H}_{\text{гор}}, \text{ где } \hat{W} = |W_{ZX} W_{ZY}|, \text{ или} \\ H_Z = W_{ZX} H_X + W_{ZY} H_Y.$$

Здесь H_X , H_Y , H_Z — составляющие наблюденного поля, W_{ZX} , W_{ZY} — компоненты индукционной матрицы, которые зависят от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей. Задача сводится к определению компонент индукционной матрицы для каждого периода вариаций.

Магнитный типпер является комплексным числом, поэтому его действительную и мнимую части можно представить следующим образом [1]:

$$\text{Re} \mathbf{W} = \text{Re} W_{ZX} \mathbf{i} + \text{Re} W_{ZY} \mathbf{j}, \\ \text{Im} \mathbf{W} = \text{Im} W_{ZX} \mathbf{i} + \text{Im} W_{ZY} \mathbf{j}.$$

По W_{ZX} и W_{ZY} определяют направление индукционных стрелок, получая информацию о наличии проводящих зон [1]. На рис. 2 и 3 представлены вещественные стрелки индукции для периодов вариаций, равных 100 и 1000 с. Видно, что их большая часть направлена от водной толщи в сторону суши,

что объясняется действием берегового эффекта. Поворот отдельных стрелок к акваториям, вероятно, связан с локальными неоднородностями или сложной формой береговой линии. На представленных результатах просматривается зависимость модуля индукционных стрелок от расстояния до берега. Более близкому расположению пунктов наблюдений к воде соответствуют удлинённые векторы и наоборот. Важно отметить, что при большем периоде вариаций азимуты определяются более устойчиво, т. к. в данном случае приповерхностные неоднородности в меньшей мере влияют на индукционные стрелки.

Как было указано выше, исследуемый район расположен в области перехода от материка к океану и характеризуется сложным геологическим строением. Существующий контраст проводимости верхнего слоя на суше и водной толщ составляет 3–4 порядка и проявляется в виде берегового эффекта, который влияет на поведение магнитного поля. Для изучения такого влияния используют трехмерное численное моделирование магнитотеллурического поля, в основе которого лежит батиметрическая карта [5]. Фрагмент карты приведён на рис. 4. В исходной модели для проведения оценки берегового эффекта отдельно от влияния приповерхностных неоднородностей мощность и удельное электрическое сопротивление приняты постоянными [3]. Верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление 30 Ом·м. Эти параметры являются примерно средними по данным электромагнитных исследований Камчатки [3]. Удельное электрическое сопротивление морской воды составляет 0,25 Ом·м. Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным. Он закономерно уменьшается с глубиной. Моделирование проведено с помощью программы Макки [8], которая позволяет получить модули вещественных и мнимых индукционных стрелок для каждого периода вариаций на пунктах профиля, где мы располагаем данными МВЗ. На рис. 5 и 6 приведены схемы модельных стрелок. Все они направлены от воды к суше и по модулю значительно превосходят экспериментальные стрелки. Особенно это хорошо заметно на графике, где сведены проекции практических стрелок на модельные и модули модельных стрелок (рис. 7). В северной части изучаемого профиля наблюдается заметное расхождение модулей стрелок, что говорит о существовании проводящего слоя в районе Камчатского перешейка, который в действительности «гасит» береговой эффект. Он выявлен при изучении глубинной электропроводности по магнитовариационным и магнитотеллурическим данным и введен в исходную модель на глубине от 30 до 50 км, его удельное электрическое сопротивление составляет 20 Ом·м [3]. После проведения повторного моделирования, учитывающего низкоомный слой, получены новые индукционные стрелки, показанные на рис. 8. Видно, что в этом случае они заметно уменьшились по модулю и стали сопоставимы с экспериментальными данными (рис. 9).

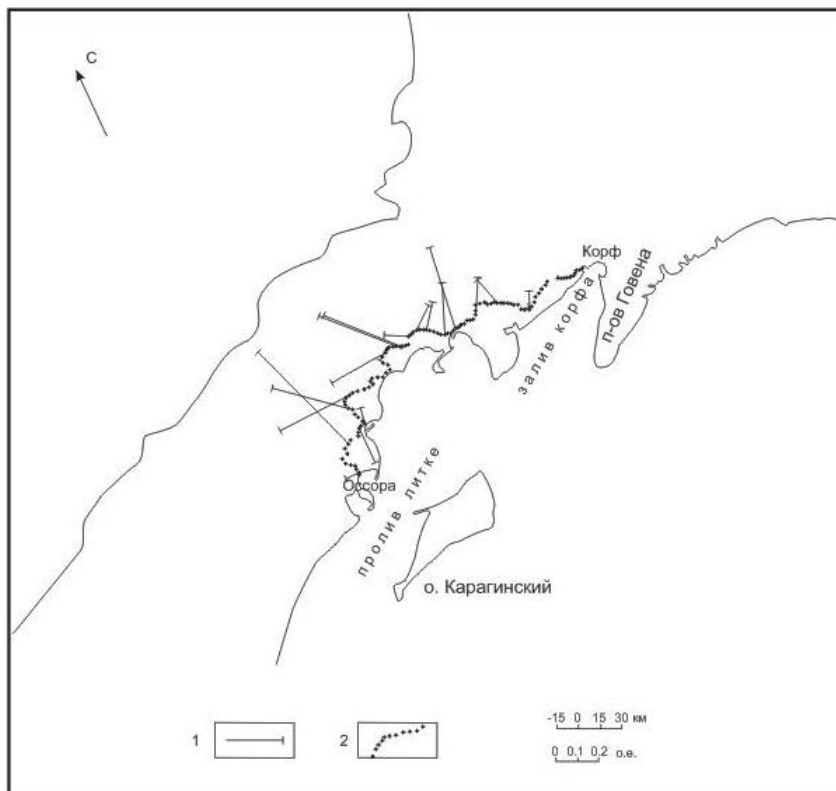


Рис. 2. Схема экспериментальных вещественных индукционных стрелок на периоде 100 с. 1 — вещественные стрелки; 2 — пункты МТЗ.

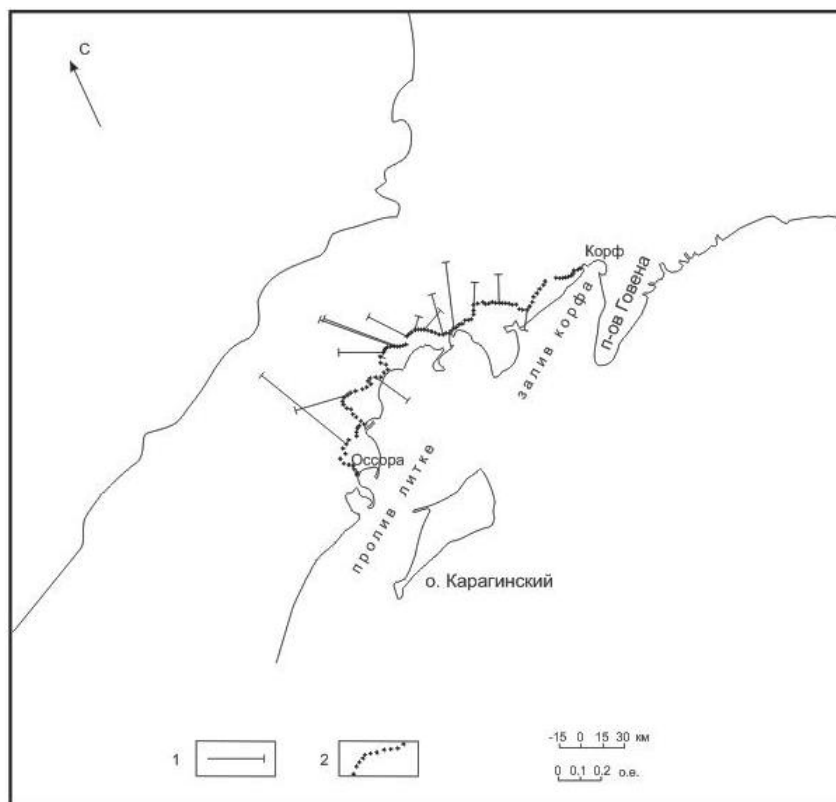


Рис. 3. Схема экспериментальных вещественных индукционных стрелок на периоде 1000 с. 1 — вещественные стрелки; 2 — пункты МТЗ.

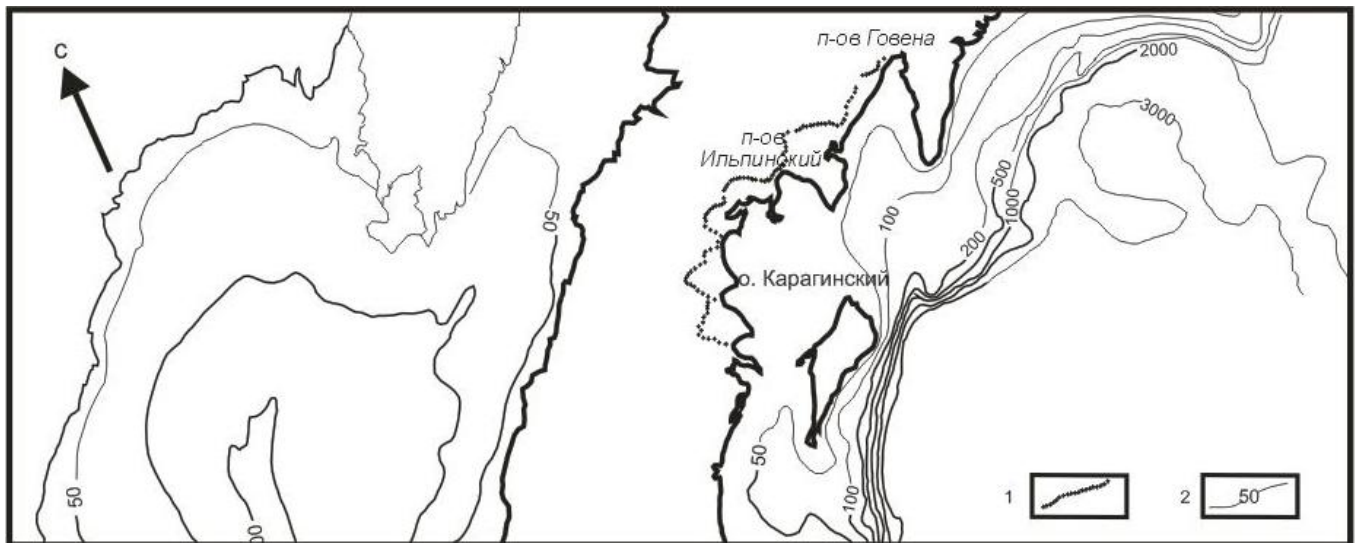


Рис. 4. . Фрагмент карты изобат [5]. 1 – пункты МТЗ; 2 – изобаты.

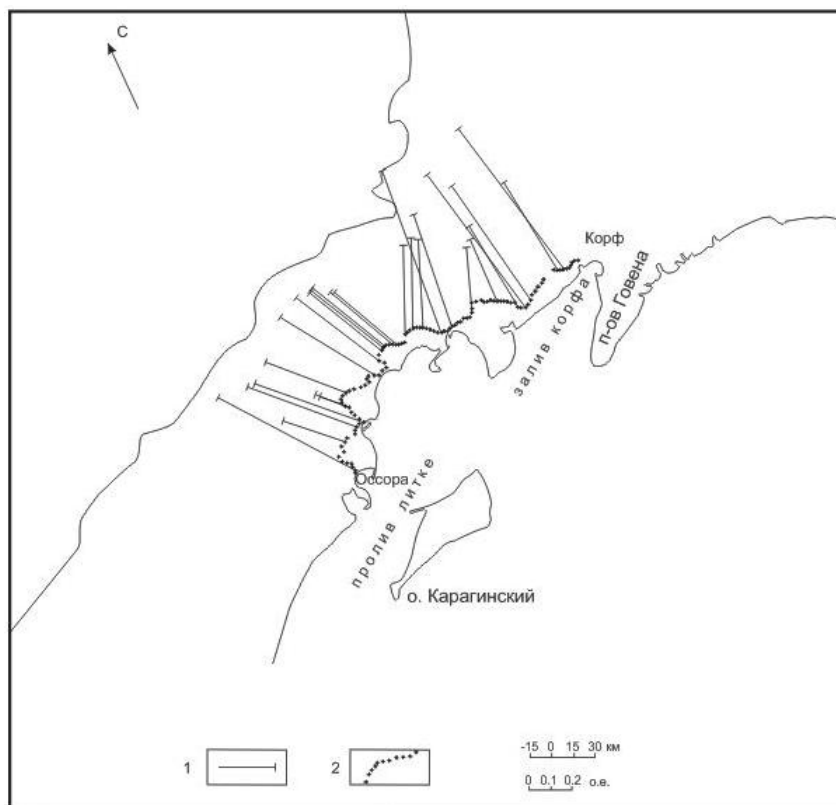


Рис. 5. Схема модельных вещественных индукционных стрелок на периоде 100 с. 1 – вещественные стрелки; 2 – пункты МТЗ.

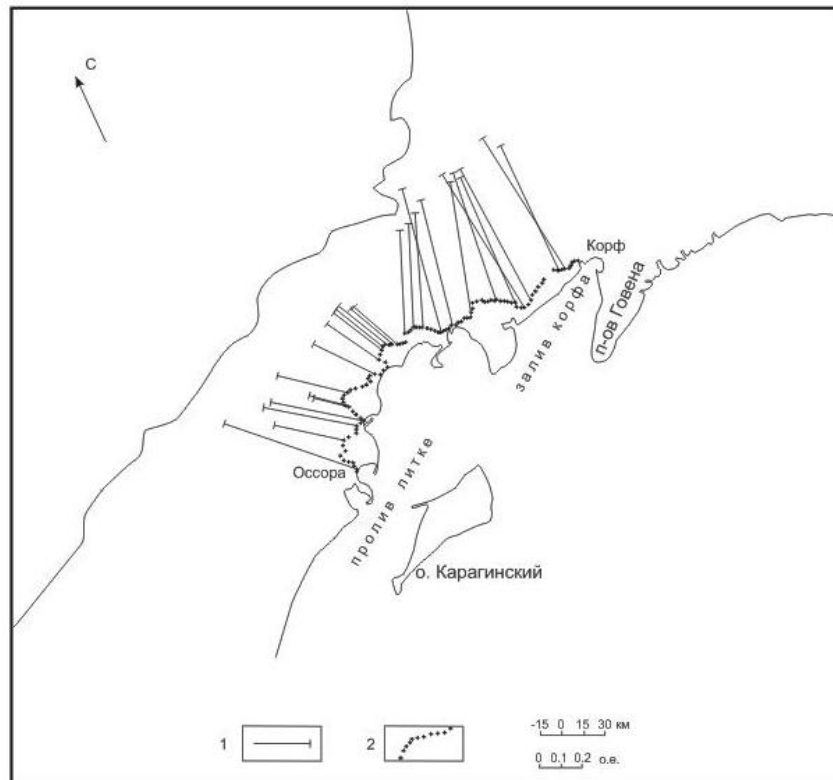


Рис. 6. Схема модельных вещественных индукционных стрелок на периоде 1000 с. 1 — вещественные стрелки; 2 — пункты МТЗ.

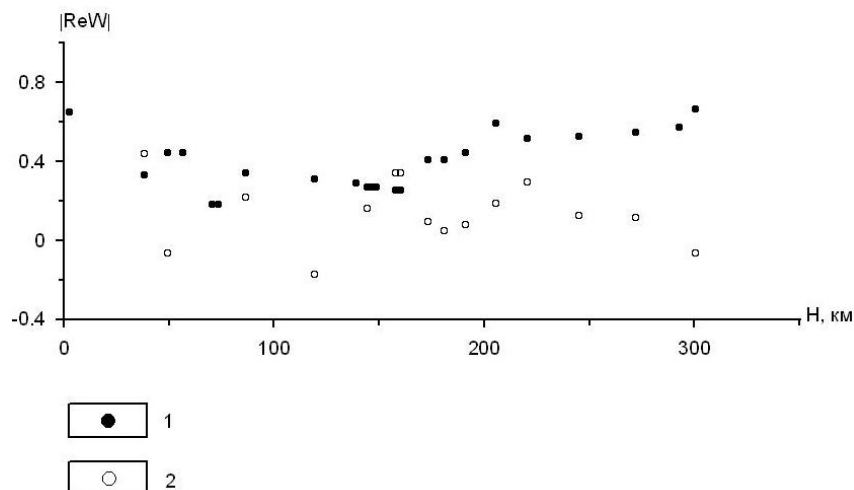


Рис. 7. Графики модулей модельных стрелок и проекций экспериментальных стрелок на модельные (модель со стандартным глубинным геоэлектрическим разрезом). 1 — модули модельных индукционных стрелок; 2 — модули проекций экспериментальных индукционных стрелок на направление модельных.

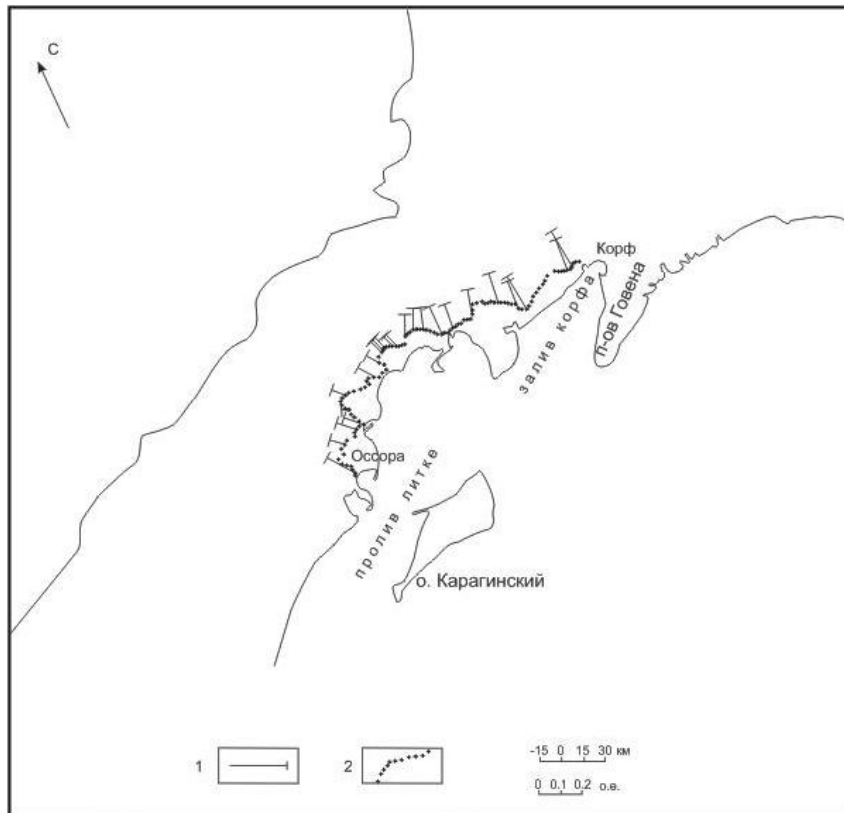


Рис. 8. Схема модельных вещественных индукционных стрелок на периоде 1000 с. для модели с проводящим слоем. 1 – вещественные индукционные стрелки; 2 – пункты МТЗ.

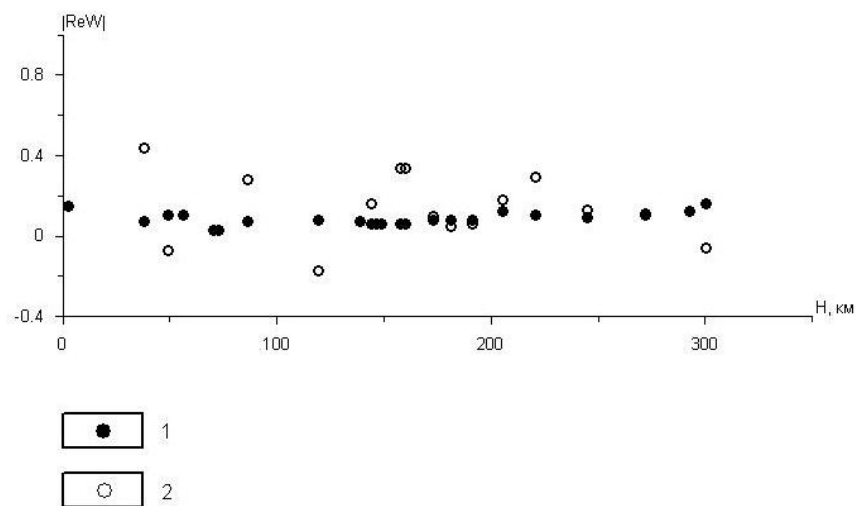


Рис. 9. Графики модулей модельных стрелок и проекций экспериментальных стрелок (модель с глубинным проводящим слоем). 1 – модули модельных индукционных стрелок; 2 – модули проекций экспериментальных индукционных стрелок на направление модельных.

Выводы

В результате обработки МВ-данных построены схемы индукционных стрелок для периодов вариаций 100 и 1000 с. Их основная часть имеет направление от акваторий заливов и проливов к материку, что указывает на действие так называемого берегового эффекта, возникающего по причине резкого контраста сопротивлений двух сред — воды и суши. Поворот отдельных стрелок, вероятно, связан с локальными неоднородностями и влиянием сложной формы береговой линии.

Воздействие берегового эффекта изучалось с помощью трехмерного численного моделирования, независимо от эффектов, связанных с геоэлектрическими неоднородностями осадочно-вулканогенного чехла. Графики проекций модулей экспериментальных стрелок на модельные, которые рассчитаны с помощью описанной модели, указывают на заметное превышение по модулю последних, особенно в северной части профиля. Важно отметить, что при увеличении периода вариаций вещественные индукционные стрелки более устойчивы, т. е. они в меньшей мере зависят от влияния локальных неоднородностей верхних частей разреза и содержат информацию о глубинной электропроводности.

По априорным данным в исходную модель введен низкоомный слой на глубине 30–50 км, который заметно «гасит» береговой эффект. Учет проводящего слоя приводит к совпадению модельных и экспериментальных индукционных стрелок. Это подтверждает предположение о повышенной глубинной электропроводности в районе восточного побережья.

Полученный результат является предварительным и требует дополнительного исследования, т. к. не учитывает трёхмерных эффектов, характерных для исследуемой местности. В будущем исходная модель будет уточнена с привлечением данных МТЗ и другой геолого-геофизической информации.

Работы выполнены ОАО «Камчатгеология» с участием ООО «Северо-Запад» (г. Москва) в соответ-

ствии с Государственным контрактом, заключенным в 2007 г. между Управлением по недропользованию по Камчатской области («Камчатнедра») и ОАО «Камчатгеология».

Авторы выражают благодарность ООО «Северо-Запад» и ОАО «Камчатгеология» за предоставленные данные МТЗ.

Список литературы

1. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Мороз Ю. Ф. Результаты исследований Восточной Камчатки комплексом методов электроразведки ТТ, МТЗ, ВЭЗ // Геология и геофизика. 1976. № 10. С. 140–144.
3. Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
4. Мороз Ю. Ф. Методика и результаты изучения электроразведкой тектоники северной Камчатки // Геология и геофизика. 1981. № 1. С. 118–126.
5. Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–71.
6. Нурмухамедов А. Г. Результаты интерпретации глубинных геофизических исследований, проведенных в районе Камчатского перешейка и материковой части Камчатского края, в свете сейсмической активности в Олюторском районе // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: Тр. региональной научно-технической конференции. Том 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 194–199.
7. Нурмухамедов А. Г., Мороз Ю. Ф. Особенности геологического строения северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным глубинных геофизических исследований // Вестник Краунц. 2008. № 1. С. 125–133.
8. Mackie K. L., Smith J. T., Madden T. R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. № 29. P. 923–935.