

Береговой эффект в Приморье, юг Дальнего Востока России

В.Б. Каплун, А.К. Бронников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения РАН, г. Хабаровск, Россия
kaplun@itig.as.khb.ru, bronnikovak1992@gmail.com

Целью магнитотеллурических исследований является выявление геоэлектрических объектов различного сопротивления в земной коре и верхней мантии, определение их границ, построение геоэлектрических разрезов и моделей. При магнитотеллурических зондированиях, использующих взаимно перпендикулярные горизонтальные компоненты электромагнитного поля E_x , H_y и E_y , H_x , измерение вертикальной составляющей магнитного поля H_z , позволяет внедрить в интерпретацию магнитовариационные функции отклика, которые определяются из линейных соотношений между компонентами магнитного поля. Использование магнитовариационной функции отклика, такой, как вектор Визе-Паркинсона, позволяет обнаружить и локализовать хорошо проводящие объекты в земной коре и верхней мантии.

Район исследований включает в себя континентальную территорию шириной 250-350 км и протяженностью свыше 1000 км, которая омывается с юга и востока водами Японского моря, а с севера – Охотского моря. Электрическое сопротивление горных пород составляет от сотен Ом·м до сотен тысяч Ом·м, морской воды – 0.3-0.4 Ом·м. Подобный контраст ЭС создает сильную магнитотеллурическую аномалию, которая называется *береговым эффектом*. Это приводит к значительным расхождениям амплитудных кривых по уровню сопротивлений при магнитотеллурических зондированиях в прибрежной зоне. Поперечная кривая, полученная при измерениях электрического поля перпендикулярно береговой линии, смещается вверх на несколько порядков относительно продольной кривой, полученной при измерениях электрического поля вдоль береговой линии, в области длинных периодов свыше 1000 с. Вектора Визе-Паркинсона (в согласии Визе ориентируются от зоны повышенной электропроводности) при береговом эффекте направлены от моря вглубь континента.

Таким образом, мы наблюдаем искажающее влияние берегового эффекта на обнаружение и локализацию проводящих объектов на континенте. С другой стороны, проявляется и обратный эффект, когда на береговой эффект влияют проводящие объекты в земной коре и верхней мантии. Это взаимодействие берегового эффекта и аномальных объектов на континенте создает сложную картину поведения векторов. В работе показано влияние берегового эффекта на обширной территории континентальной части юга Дальнего Востока России и его взаимодействие с проводящими объектами. Выявлено, что на проявление берегового эффекта оказывает наличие высокого электрического сопротивления горных пород в прибрежной части континента.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, береговой эффект, Сихотэ-Алинь.

ВВЕДЕНИЕ

Проявление берегового эффекта на юге Дальнего Востока впервые было обнаружено сотрудниками СахКНИИ ДВНЦ АН СССР в 1964 г. при изучении вариаций переменного магнитного поля Земли (Ваньян, Мардерфельд, 1966а,б). Также было сделано предположение, что отсутствие этих аномалий связано с особенностями глубинного геоэлектрического строения района исследований. Расстояние, на котором действовал береговой эффект, оценивалось в 250-300 км, а глубина до поверхности проводящего слоя составила 100-150 км. Индукционные вектора магнитного поля, построенные по предложенной авторами методике на периоде 1 час для континентальной части юга Дальнего Востока, направлены в сторону моря, т.е. в сторону проводника (Мардерфельд, 1977). Последующие

исследования, выполненные на континентальной части юга Дальнего Востока в 70-е годы прошлого столетия, подтвердили наличие берегового эффекта в переменном геомагнитном поле. Здесь были построены профили векторов Визе-Паркинсона и определена глубина до астеносферного слоя равная 100-135 км (Никифорова, Ахмадулин, Порай-Кошиц и др., 1980, Порай-Кошиц, Ноздрин, Хализов и др., 1980). Вместе с экспериментальными исследованиями проводились физическое (Мардерфельд, 1977) и численное (Жданов, Бердичевский, Файнберг, 1983, Бердичевский, Жданова, Жданов, 1989) моделирование проявлений берегового эффекта для зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. В работе (Бердичевский, Жданова, Жданов, 1989) было выполнено численное моделирование электромагнитного поля для трех различных

двумерных моделей. Расчеты показали, что при отсутствии осадочного чехла происходит более быстрое затухание берегового эффекта в сторону континента, т.е. усиление геоэлектрического контраста суша-море не обязательно приводит к усилению берегового эффекта. На амплитудных кривых МТЗ береговой эффект проявляется в резком изменении уровня поперечной кривой, особенно в прибрежной зоне вплоть до 7 порядков на расстоянии 10 км от береговой линии, и его влияние проявляется на расстоянии до 400 км. На продольной кривой береговой эффект в прибрежной зоне выражен слабо и на расстояниях несколько десятков километров от берега она практически сливается с нормальной кривой.

В последние два десятилетия изучение берегового эффекта Азиатско-Тихоокеанского региона проводилось путем численного моделирования на трехмерных моделях (Никифоров и др., 2004, Kuvshinov, Utada, 2010, Пальшин, Алексеев, 2017). В работе (Никифоров и др., 2004) модель задавалась исходя из общих представлений о геоэлектрическом разрезе с приповерхностным слоем мощностью 8 км подстилаемым распределением слоев с сопротивлениями характерными для стабильных регионов Земли. Расчеты выполнены для диапазона от 1000 до 100000 с, влияние берегового эффекта рассмотрено на периоде 2 часа. Показано, что на континентальной части юга Дальнего Востока расчетные значения модуля реального индукционного вектора имеют в основном величину 0.1-0.3, достигая 0.5 на побережье, и направлены на юго-восток под углом 130-150°. Расчеты, выполненные по вертикальной компоненте Z дневных (S_q) вариаций геомагнитного поля для Японии (Kuvshinov, Utada, 2010), показали, что аномальное поведение геомагнитного поля может быть связано не с глубинными аномалиями электропроводности, а с влиянием трехмерного берегового эффекта. Численное моделирование в зоне перехода от Тихого океана к Евразии показало, что его воздействие может быть уменьшено при наличии глубинных проводящих разломов (Пальшин, Алексеев, 2017).

На территории юга Дальнего Востока МТЗ выполняются в широком частотном диапазоне, начиная с 70-х годов прошлого столетия, но изучение влияния берегового эффекта на полевые данные не проводилось. Нами, в период с 2017 по 2019 годы, было выполнено три профиля МТЗ (Каплун, Бронников, 2018а, Каплун, Бронников, 2019, Каплун, Бронников, 2020), которые начинаются на континенте, протягиваются на 250-300 км и заканчиваются на побережье Японского моря. Мы рассмотрели влияние берегового эффекта на полевые

данные и обнаружили, что он практически не выражен на амплитудных кривых. Нами были сделаны численные расчеты различных моделей для двумерных и трехмерных сред (Каплун, Бронников, 2018б) и получены результаты, которые легли в основу данных исследований. Целью данной работы является изучение влияния берегового эффекта на результаты МТЗ в континентальной части юга Дальнего Востока России, выявления условий его проявления и учета при интерпретации.

Тектоническое строение

Территория исследований включает в себя южную часть Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС) и сопредельного с ней Ханкайского массива (рисунок 1). САСС среднемелового возраста протягивается в северо-восточном направлении почти на 1500 км от южного побережья Приморья до северной оконечности о.Сахалин. В пределах района исследований на западе он граничит с Ханкайским массивом по серии разломов – Арсеньевский, Алчанский. Восточная граница САСС скрыта под водами Японского моря и Татарского пролива. Крупными структурными элементами системы являются Центральная, Восточная и Прибрежная структурно-формационные зоны, представляющие собой крупные тектонические блоки с различным по полноте и возрасту формационным наполнением. На востоке САСС перекрыта породами Восточно-Сихотэалинского вулканического пояса и является частью крупнейшего Восточно-Азиатского вулканоплутонического пояса. Возрастной диапазон слагающих его формаций — поздний альб-миоцен. Ханкайский массив представляет собой сложное гетерогенное сооружение, в которое объединены блоки докембрийского кристаллического фундамента, разделенные структурами деформированного чехла, сложенными раннепалеозойскими формациями.

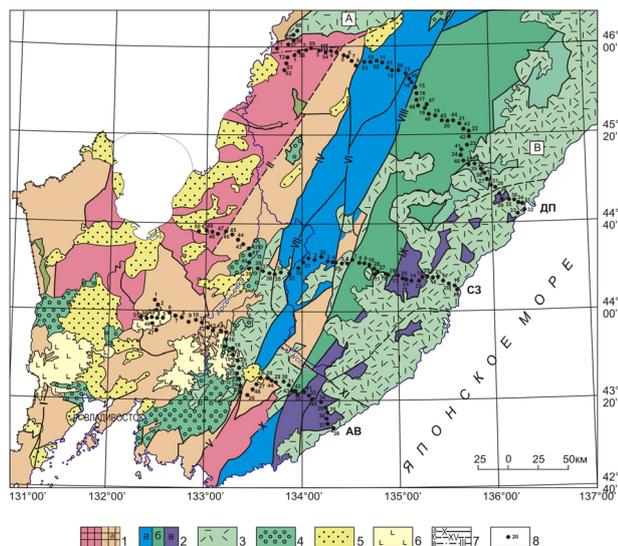


Рисунок 1. Тектоническая схема Сихотэ-Алинской складчатой системы и сопредельных территорий по (Гос. геол. карта РФ М 1:1000000 (третье поколение), 2011) с профилями магнитотеллурических зондирований.

1 - Ханкайский массив, а - структуры деформированного чехла Ханкайского массива; 2 - Сихотэ-Алинская складчатая система: а - Центральная зона, б - Восточная зона, в - Прибрежная зона; 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): I - Западно-Приморский, II - Среднеханкайский, III - Дальнереченский, IV - Арсеньевский, V - Партизанский, VI - Меридиональный, VII - Самаркинский, VIII - Центральный, IX - Фурмановский, X - Кривинский, XI - Южно-Приморская группа разломов; 8 - пункты МТЗ и их номера профилей: ДП - г.Дальнереченск - п.Пластун, СЗ - г.Спасск-Дальний - бух.Зеркальная, АВ - с.Абражеевка - п.Валентин.

Исходные данные

Профили МТЗ (рисунок 1) начинаются на Ханкайском массиве, протягиваются на 250-300 км, пересекая САСС вкрест ее простирания, и заканчиваются на побережье Японского моря. Профили расположены друг от друга на расстоянии 80-150 км. Измерения электромагнитного поля проводились цифровой 24-разрядной электроразведочной станцией МТУ-5А с магнитными индукционными датчиками МТС-30 и МТС-50, производства фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада) в широком частотном диапазоне от 10^4 Гц до $4 \cdot 10^{-4}$ Гц. Измерение электрического поля

проводилось с использованием линий длиной 70-100 м, вытянутых в направлениях север-юг (Ех) (север соединялся с положительной клеммой прибора, юг – с отрицательной) и восток-запад (Еу) (восточный электрод соединялся с положительной клеммой прибора, западный – с отрицательной). Для заземления использовались слабополяризующиеся электроды Pb-PbCl. Измерялось три компоненты магнитного поля, Нх, Ну – по направлениям электрических линий, и вертикальная составляющая Hz. Время регистрации в большинстве случаев составляло 19-20 часов. Шаг измерения между точками варьировал от 2 до 7 км, в среднем составлял 5 км.

Анализ амплитудных кривых, полученных в результате полевых измерений, показал, что на них не наблюдается значительного расхождения продольной и поперечной кривых даже в пункте зондирования, расположенном на берегу. Продольная и поперечная кривые имеют близкую друг другу форму и близки по уровню сопротивлений (рисунок 2).

Исходя из этого, можно предположить, что подобное явление связано с параметрами геоэлектрического разреза района исследований, которое приводит к компенсации берегового эффекта.

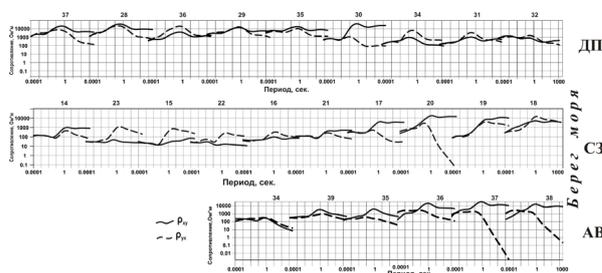


Рисунок 2. Береговые кривые профилей МТЗ в Приморье, показанных на рисунке 1.

Анализ результатов

Распределение индукционных векторов Визе показало, что примерно до 1с их направление имеет хаотичный характер. Это вероятно связано с локальными приповерхностными аномалиями, за исключением пунктов, расположенных на берегу моря, вектор которых направлен в сторону от моря. В диапазоне периодов от 1 до 10с происходит постепенный поворот стрелок от моря на пунктах, расположенных примерно в пятидесятикилометровой береговой зоне, с уменьшением их величины. С увеличением периода от 10 до 1000с наблюдается постепенный разворот стрелок от моря, за исключением отдельных пунктов, при этом увеличивается величина векторов. Кроме этого на поведение векторов влияют глубинные

поводящие зоны и разломы. Это отчетливо проявлено на профиле АВ, где в западной его части, несмотря на близость моря, вектора даже на больших периодах направлены в сторону берега. На профиле также отмечается и влияние Партизанского разлома, который является проводящей зоной, вдоль которой выстраиваются вектора в диапазоне периодов от 30 до 100с. Другой особенностью отличается поведение векторов на профиле ДП, где отмечается малая их величина в его центральной части. Это может свидетельствовать о наличии здесь проводящего объекта. По трем профилям были построены разрезы частотных зависимостей величины полного вектора Визе (W) и его горизонтальных составляющих (W_{zx} и W_{xy}) от периода.

Величина полного вектора W_r и его составляющих W_{rx} и W_{ry} очень сильно варьирует как по простиранию, так и по периоду. На всех трех разрезах W_r (рисунок 3) отмечается, что вблизи моря величина вектора минимальна (менее 0.1) до периодов 10⁻³с. С увеличением периода его величина резко увеличивается и может превышать величину 0.2, которая, согласно (Dosso and Meng, 1992) соответствует влиянию берегового эффекта, на расстоянии примерно 60 км на профилях СЗ и ДП. На профиле АВ это влияние проявляется на протяжении 130 км, но это связано с тем, что он расположен наиболее близко к береговой линии, максимально на расстоянии около 100 км. На всех трех разрезах хорошо видно, что на периодах до 10⁻¹с величина вектора W_r имеет большие значения в узкой береговой полосе около 10 км, а с увеличением периода начинает плавно расти. Наибольшее влияние берегового эффекта проявляется на периодах от 100 до 1000с.

Анализ разрезов горизонтальных составляющих W_{rx} и W_{ry} полного вектора показал, что основной вклад в величину вектора W_r на профиле АВ имеет W_{rx}, а на профилях СЗ и ДП – W_{ry}, т.е. для профиля АВ основное влияние имеют токи, текущие в меридиональном направлении, а для профилей СЗ и ДП – в широтном, перпендикулярно побережью САСС.

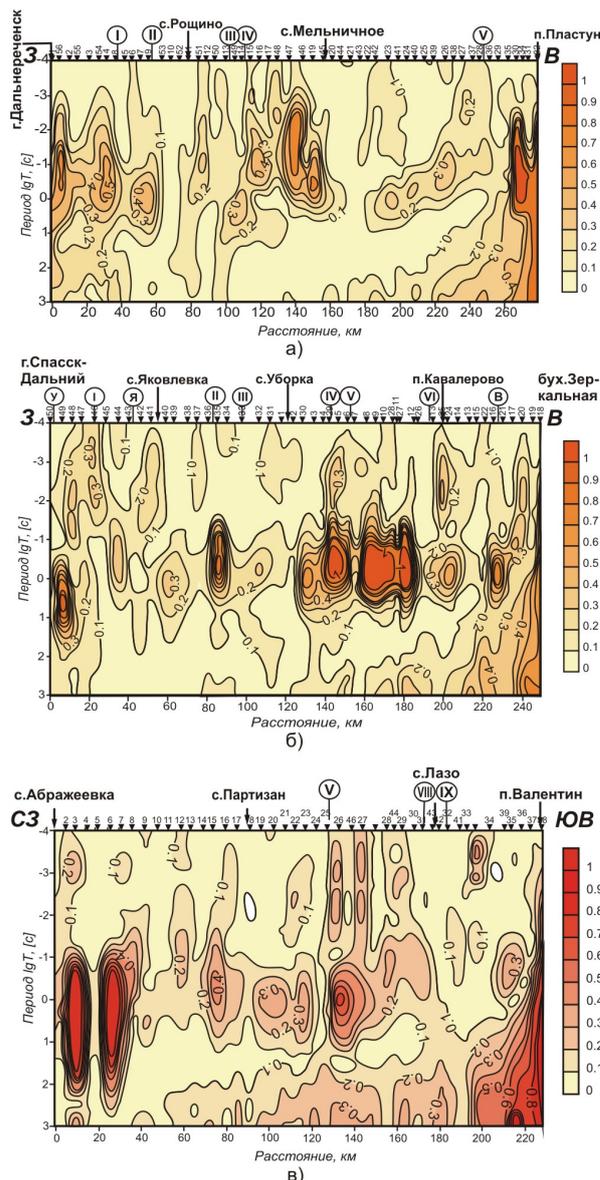


Рисунок 3. Величина полного вектора типпера W_r в зависимости от периода по профилям: Дальнереченск – Пластун (а), Спасск-Дальний – бух.Зеркальная (б) и Абражеевка – бух.Валентин (в).

Модельные расчеты

Модельные расчеты проводились с использованием программы ModEM (Kelbert et al., 2014). Для изучения явления берегового эффекта были созданы 32 модели. Для каждой был произведён расчёт прямой задачи в диапазоне периодов от 0.0001с до 1000с. Для моделирования использовались пункты зондирования трёх профилей в Приморье: ДП, СЗ, АВ (рисунок 1).

В качестве исходной была создана базовая модель, состоявшая из 4 слоёв. Первый – мощностью 30 км и сопротивлением 10000 Ом·м, второй – 55 км и 300 Ом·м, третий – 35 км и 450 Ом·м, четвёртый – начинающийся на 120 км и уходящий в глубину с постепенно

уменьшающимся сопротивлением от 100 Ом·м до 10 Ом·м на глубинах больше 200 км, а глубже подстилается стандартным разрезом в редакции Ваньяна (Ваньян, 1997). Данная модель была построена обобщением разрезов профилей, полученных ранее при инверсии МТЗ (Каплун, Бронников, 2018а, Каплун, Бронников, 2019, Каплун, Бронников, 2020). В базовую модель было добавлено море с учётом географии и батиметрии. В модели оно представлено слоем переменной мощности, расположенного в южной и восточной частях модели с сопротивлением 0.3 Ом·м. В дальнейших расчетах происходило уточнение геоэлектрического разреза, проверка влияния астеносферного проводящего слоя на уровень амплитудных кривых МТЗ, влияние осадочного чехла и разломов. Расчеты проводились как по отдельным параметрам, как и в различном сочетании. Численное моделирование показало, что все выше перечисленные геоэлектрические неоднородности и изменение величины электрического сопротивления, мощности и глубины залегания приводит к усилению или ослаблению берегового эффекта, но не являются определяющими его влияния на амплитудные кривые. Основным фактором, позволяющим в значительной мере уменьшить влияние берегового эффекта, является наличие между морем и континентом блока земной коры высокого электрического сопротивления (рисунок 4б).

Выводы

Анализ векторов Визе для различных периодов, а также разрезов частотных зависимостей величины полного вектора Визе (W) и его горизонтальных составляющих (W_{zx} и W_{xy}) от периода показал, что влияние берегового эффекта может распространяться на расстоянии до 100-130 км на периоде 1000 с, но наиболее сильное его влияние отмечается в прибрежной зоне на расстоянии 40-60 км. Вместе с этим отмечается влияние локальных и глубинных проводников на поведение векторов Визе. Они или отклоняют их направление от моря, или уменьшают их величину. Отклонение направлений векторов отчетливо проявлено при измерениях вблизи глубинных проводящих разломов.

Анализ разрезов горизонтальных составляющих W_{rx} и W_{ry} полного вектора W_r показал, что основной вклад в его величину имеют токи, текущие перпендикулярно побережью САСС. В результате численного моделирования выяснено, что основным блокирующим влиянием на действие берегового эффекта на амплитудные кривые МТЗ может оказывать высокое электрическое сопротивление горных пород прибрежной части Приморья, которое

блокирует перетекание электрического тока с моря на континент.

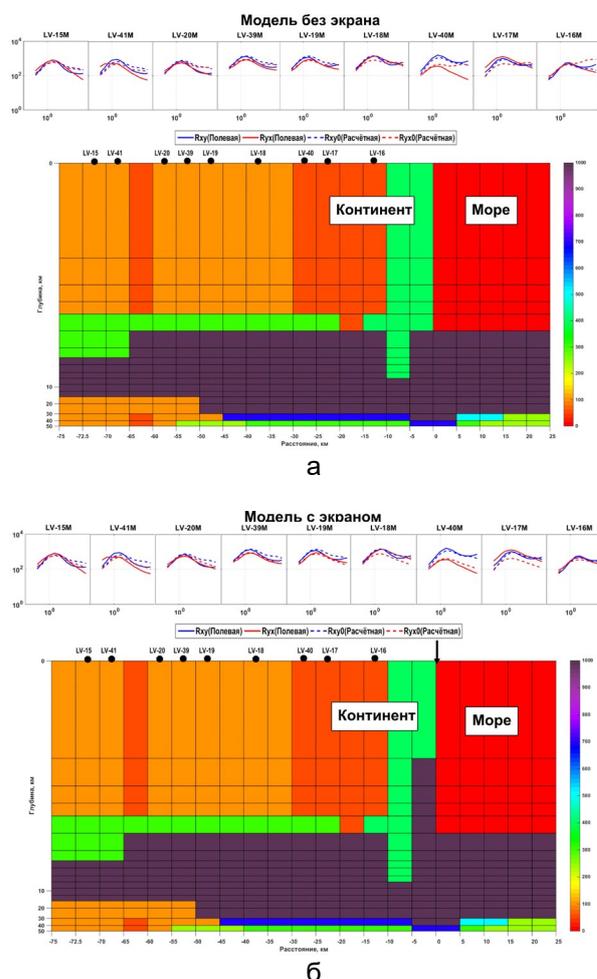


Рисунок 4. Геоэлектрические модели для расчета влияния берегового эффекта: а – без вставки высокого электрического сопротивления на границе континент-море, б – со вставкой.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-17-00015.

ЛИТЕРАТУРА

Бердичевский МН, Жданова ОН, Жданов МС, 1989 Глубинная геоэлектрика в океане. М: Наука.

Ваньян ЛЛ, Мардерфельд БЕ, 1966б О влиянии местных геоэлектрических условий на внезапные начала магнитных бурь. Геомагнетизм и аэрномия, Т.6, №1, с 163-165

Ваньян ЛЛ, Мардерфельд БЕ, 1966а Некоторые закономерности геомагнитных бурь на Сахалине. Геомагнетизм и аэрномия, Т.6, №1, с 165-166

Ваньян ЛЛ, 1997 Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир

Государственная геологическая карта РФ М 1:1000000 (третье поколение), 2011 L-(52),53 (K-52,53) (оз.Ханка). ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург.

Гос. геол. карта РФ М 1:1000000 (третье поколение), 2011 L-(52),53 (K-52,53) (оз.Ханка). Объяснительная записка. ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург.

Жданов, Бердичевский, Файнберг и др., 1983 Исследование магнитовариационных аномалий в зоне перехода от Азиатского материка к Тихому океану Сборник ИЗМИРАН, М. с 8-15.

Каплун ВБ, Бронников АК, 2018а Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю г.Спасск-Дальний – бух.Зеркальная по данным магнитотеллурических зондирований. Тихоокеанская геология, №5, с 31-47.

Каплун ВБ, Бронников АК, 2018б Изучение влияния берегового эффекта на результаты магнитотеллурических зондирований в южной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Материалы 45-й сессии Международного семинара «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Казань: Изд-во Казан. Ун-та, с 118-119.

Каплун ВБ, Бронников АК, 2019 Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю г.Дальнереченск – с.Роцино – п.Пластун по данным магнитотеллурических зондирований. Тихоокеанская геология, №5, с 3-13.

Каплун ВБ, Бронников АК, 2020 Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по профилю с.Абражеевка – п.Валентин по данным магнитотеллурических зондирований. Тихоокеанская геология, №4, с 3-15.

Мардерфельд БЕ, 1977 Береговой эффект в геомагнитных вариациях. М., Наука

Никифорова, Ахмадулин, Порай-Кошиц и др., 1980 Глубинные магнитотеллурические исследования в Хабаровском крае. В книге: Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР с 42-49.

Никифоров ВМ, Пальшин НА, Старжинский СС, Кузнецов ВА, 2004 Численное моделирование трехмерного берегового эффекта в Приморье Физика Земли, №8, с56-69.

Пальшин НА, Алексеев ДА, 2017 Особенности глубинной электропроводности в зоне перехода от Тихого океана к Евразии. Физика Земли, №3, с 107-123.

Порай-Кошиц АМ, Ноздрина АА, Хализов АЛ, Шимелевич МИ, 1980 Об интерпретации данных магнитовариационного профилирования в Приморском крае. В книге: Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР с 124-126.

Dosso HW, Meng ZW, 1992 The coast effect response in geomagnetic field measurements. Phys Earth Planet Inter 70: 39-56.

Kelbert A, Meqbel N, Egbert G, Tandon K, 2014 A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data Comput Geosci 66: 40–53.

Kuvshinov A, Utada H, 2010 Anomaly of the geomagnetic Sq variation in Japan: effect from 3-D subterranean structure or the ocean effect? Geophys J Int 183: 1239–1247.