

О возможности выбора между конкурирующими моделями Байкальского рифта по магнитовариационным наблюдениям в районе глубоководного мониторинга Ez

Д.А. Орехова¹, М.С. Кругляков¹, С.М. Коротаев¹, Н.М. Буднев², В.Х. Кириаков³, Р.Р. Миргазов²

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, ordaal@gmail.com

²Иркутский государственный университет, nbudnev@api.ru

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН, vladkiriakov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В ходе развития байкальского эксперимента по мониторингу вертикальной электрической компоненты поля в водной толще были проведены длительные магнитные наблюдения в трех точках на побережье южной котловины озера Байкал. Рассматриваются возможности применения полученных измерений градиентов магнитного поля для выбора между альтернативными представлениями о глубинном геоэлектрическом строении Байкальского рифта.

Ключевые слова: Байкал, магнитовариационные данные, геоэлектрика

ВВЕДЕНИЕ

Первоначально магнитные измерения, о которых пойдет речь, начали проводиться на побережье южной котловины озера Байкал в точке, наиболее близкой к району глубоководного эксперимента по мониторингу Ez в водной толще (Korotaev et al., 2018), лишь как дополнение к основным. Их целью было подтверждение отсутствия в Ez теллурической составляющей. Анализ нескольких синхронных годовых серий измерений Ez и модуля магнитного поля достоверно подтвердил это отсутствие, что было также обосновано результатами расчетов на детальной (с учетом известных разломов) трехмерной геоэлектрической модели Байкала. Затем, поскольку одной из задач этого многоцелевого эксперимента является поиск предвестников землетрясений, но их эффект в Ez очень локальный (радиус обнаружимости землетрясения с $M=6$ оценивается всего лишь 50 км), было решено дополнить электрический мониторинг магнитными измерениями на суше. В гораздо менее локальной магнитной составляющей поля радиус обнаружимости землетрясения должен быть значительно больше. Магнитотеллурическая помеха в ней неустранима, но может быть ослаблена при измерениях градиентов поля, причем при измерении медленных вариаций ослаблена значительно. Именно с этой целью были развернуты магнито-градиентметрические наблюдения в этом районе. Поскольку требовалось измерение именно медленных вариаций, за техническую основу были взяты протонные магнитометры, так как магнитометры

этого типа свободны от дрейфа нуля. Однако достаточно сильные землетрясения представляют редкое событие, поэтому была поставлена задача также по возможности использовать этот длительный мониторинг для изучения глубинного геоэлектрического разреза.



Рисунок 1. Расположение точек наблюдения магнитных полей и Ez.

Всего было установлено три протонных магнитометра с выводом данных в сеть Интернет в режиме реального времени (рисунок 1). Для измерения градиента поля вкост простирания разлома, проходящего в районе нейтринной обсерватории вдоль побережья озера Байкал, были размещены два магнитометра ММП-203: один вблизи воды (mmp1), другой вглубь берега на расстоянии 1 км (mmp2). Для измерения градиента поля вдоль простирания этого разлома на расстоянии 90 км был установлен третий протонный

магнитометр ММП-203 на космофизическом полигоне Долина Тунка. В качестве еще одной точки наблюдений используется магнитная обсерватория Иркутск.

Разумеется, по столь ограниченной области наблюдений нельзя самостоятельно построить региональную модель. Однако, пользуясь преимуществом большой длительности наблюдений по сравнению с обычными полевыми исследованиями можно поставить задачу выбора между некоторыми отдельными идеями о строении Байкальского рифта.

Модель и методы

Исходная базовая трехмерная геоэлектрическая модель Байкальского региона включала в себя котловину озера Байкал, его осадочное обрамление с мощностью до 4000 м, осадочный слой Сибирской платформы, Тункинскую кайнозойскую впадину, основные разломы и кристаллический фундамент. Глубинная часть модели была приведена в соответствие с интерпретацией результатов МТЗ в средней части рифта из (Мороз, Мороз, 2012), и содержала три проводящих слоя в интервалах глубин 10-20 км, 35-50 км и 170-230 км, которые в Прибайкалье (под Сибирской платформой) могут отсутствовать или уходить ниже, чем под Байкалом. В дальнейшем эта модель была значительно доработана и детализирована, в частности, по результатам других известных МТЗ, сосредоточенных в центральной части Байкальского региона, а часть модели, соответствующая Тункинской впадине – по результатам известных ВЭЗ.

Для определения чувствительности градиентов магнитного поля в районе мониторинга к принципиальным изменениям геоэлектрического разреза на основании исходной, были построены две группы моделей – типа мантийный диапир и типа астеносферный выступ. Также в моделях варьировалась граница (изменение глубины) проводящих слоев в исследуемой части региона (в районе Шарыжалгайского выступа), асимметричность астеносферы, проводимость верхнего проводящего слоя, наличие сети главных разломов, их параметры, глубина, соединение с астеносферой, сопротивление кристаллического основания.

При расчетах использовалась следующая сетка: по горизонтали в обоих направлениях 1000 м, по вертикали от 500 м для верхних 4 км и далее шаг увеличивался вплоть до 100 км в нижней части модели. При такой сетке модель содержит более 6 млн ячеек. Размеры наших моделей составили 400 км по вертикали, 306 км на 700 км по горизонтали.

Расчет магнитных полей для этих моделей

проводился в четырех точках, соответствующих местам наблюдений: две точки на берегу озера mmp2 (51.80449 N, 104.417611 E) и mmp1 (51.800497 N, 104.417718 E), Тункинский полигон (51.813472 N, 103.070333 E), магнитная обсерватория Иркутск (52.17 N, 104.45 E). Кроме того, рассчитывалась вертикальная компонента E_z в точке глубоководного мониторинга (51.721 N, 104.416 E), и все наши модели должны были удовлетворять условию, что в этой точке она пренебрежимо мала. Расчетный диапазон периодов – от минут до суток.

Модельные расчеты полей велись с использованием суперкомпьютеров по оригинальной программе М.С. Круглякова, реализующей метод интегральных уравнений (Kruglyakov, Kuvshinov, 2018).

Хотя в дальнейшем будет обсуждаться только отклик градиентов магнитного поля на геоэлектрическую структуру, подчеркнем особую роль E_z . Как отмечалось выше, многолетние измерения показали почти полное отсутствие теллурической составляющей в E_z в точке наблюдений. Точнее, теллурическая E_z не превышает 5% горизонтальных компонент и незаметна на фоне гидродинамических полей. Вообще говоря, заметная теллурическая E_z может возникнуть над неоднородностями разреза, особенно над разломами. Это вопрос был детально изучен с помощью расчетов на исходной трехмерной модели, с тем отличием, что в нее были включены не только крупные, но и все достоверно известные Байкальские разломы. Это потребовало расчетов на густой сетке, содержащей более 53 млн ячеек. В результате было показано, что E_z действительно, ни при каких условиях не превышает 5% горизонтальных компонент. Это условие практического отсутствия E_z сохраняло роль контроля реалистичности всех рассматриваемых далее моделей.

Расчеты

Всего было построено несколько десятков моделей с варьируемыми параметрами среды. Для них в рассматриваемых точках рассчитывались следующие четыре функции, при этом за опорную была принята обсерватория Иркутск:

1. - отношение модулей полей в точке к опорной точке - $|\text{mag}|/|\text{mag1}|$,
 2. - модуль разности полей к модулю поля в опорной точке $|\text{mag}-\text{mag1}|/|\text{mag1}|$,
 3. - разность фаз $[\text{mag}-\text{mag1}]$,
 4. - разность фаз $[(\text{mag}-\text{mag1})-\text{mag1}]$,
- где mag1 – вариация модуля поля опорной точке, mag – в остальных точках.

В построении экспериментальных функций

электропроводности для сопоставления с модельными основной проблемой оказался неожиданно высокий уровень промышленных шумов: помехи по сетевому питанию, электромагнитные наводки на кабели датчиков протонных магнитометров, высокие градиенты постоянного поля искусственных магнитных масс, сбивающие сигнал этих датчиков и, наконец, перемещение магнитных масс вследствие инженерной деятельности на обсерватории и промыслов местного населения. Были приняты значительные усилия по перемещению магнитометров на площадки с меньшим уровнем электромагнитного загрязнения, хотя проблема не всегда могла быть решена полностью, т.к. из-за большого энергопотребления протонных магнитометров в любом случае требовалось подведение сетевого питания.

Из вышеозначенных четырех функций, которые можно получить из спектров модуля магнитного поля в паре точек, наиболее помехозащищённой оказалась разность фаз между средним по базе градиентом поля и самим полем, т.е. в нашем случае между разностью (комплексных) полей в какой-либо из точек и в Иркутске и полем в Иркутске.

Для расчетов выбирались наиболее свободные от помех интервалы времени с 2017 г. до 2020 г. При этом для каждого интервала времени и каждого периода в модельных расчетах поляризация поля выбиралась равной фактической эллиптической поляризации в Иркутске. Поэтому вид модельных частотных кривых для разных временных реализаций различен. Тем важнее было убедиться, что выводы о близости натурной кривой к какой-либо из модельных не зависят от их поляризационной изменчивости. В то же время степень различимости самих моделей, как показали расчеты в двух ортогональных линейных поляризациях, существенно от этих поляризаций зависит (Орехова и др., 2017). Поэтому, если фактическая поляризация далека от оптимальной, некоторые из модельных кривых могут быть малоотличимы.

На рисунке 2 показан пример сопоставления экспериментальной и модельных кривых разностей фаз градиента поля (функция 4) и опорного поля для точки Тунка.

Здесь Модель 1 – исходная модель с тремя проводящими слоями и сетью главных разломов, залегающих до глубины первого слоя. Граница проводящих слоев проходит по границе осадочного чехла Сибирской платформы и Шарыжалгайского выступа. Модель 2 – исходная модель с сетью главных разломов, залегающих до глубины первого слоя. Граница слоев проходит по границе выступа фундамента и складчатого пояса

(вблизи нашей точки Тунка). Модель 3 – модель мантийного диапира, то есть модель 2 плюс разлом, соединяющий второй проводящий слой с астеносферой. Модель 4 – модель мантийного диапира, сеть главных разломов проходит от поверхности до астеносферы. Модель 5 – модель астеносферного выступа. Модель 6 – модель 2, с более проводящим разломом, проходящим вдоль побережья Байкала (1 Ом м против 10) и менее проводящим Ангарским разломом, проходящим рядом с точкой Иркутск (10 Ом м верхние 2.5 км и 500 Ом м ниже против 10 Ом м).

Для данной точки, во-первых, можно сказать, что наиболее критично положение границы проводящих слоев относительно Шарыжалгайского выступа (модель 1, отличающаяся от модели 2 только вхождением проводящих слоев под этот выступ). Во-вторых, основные рифтовые разломы имеют умеренную глубину заложения – в пределах коры (модель 4 с гипертрофированной глубиной разломов хуже умеренной модели 3). В третьих гипотеза астеносферного выступа хуже удовлетворяет наблюдениям, чем гипотеза мантийного диапира или отсутствия глубинной неоднородности. Но подтвердить наличие самого мантийного диапира по нашим данным нельзя.

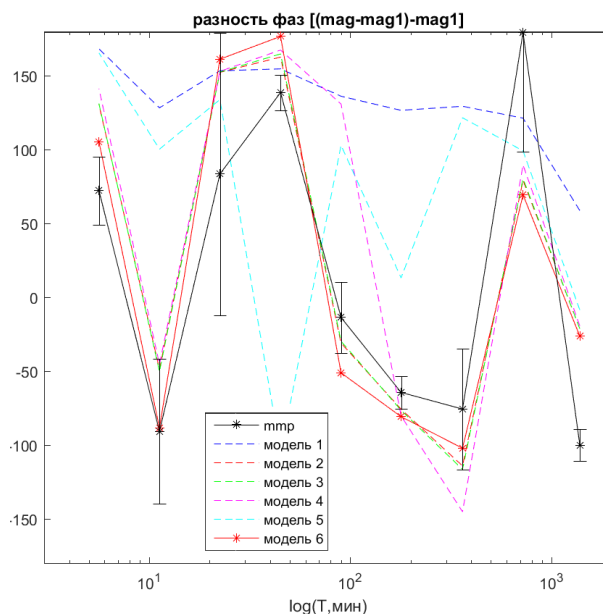


Рисунок 2. Пример разности фаз градиента поля на базе Тунка–Иркутск и поля в Иркутске.

Для точек на самом побережье Байкала все сложнее. На рисунке 3 показан пример сопоставления кривых для точки расположения магнитометра mmp2 для некоторых из тех же моделей. Здесь основной вклад вносят именно параметры разломов, проходящих рядом с этой точкой и опорной.

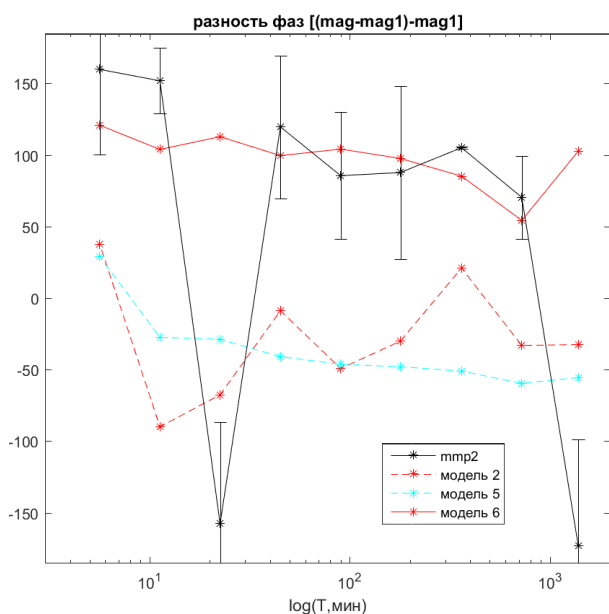


Рисунок 3. Пример разности фаз градиента поля на базе побережье (mmp2)–Иркутск и поля в Иркутске.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По имеющимся геолого-геофизическим данным построена базовая трехмерная геоэлектрическая модель Байкальского рифта, и ее вариации, отражающие предположения о его глубинном строении. На их основе выполнены расчеты поля и функций электропроводности в районе эксперимента. Сопоставление с результатами измерений градиентов вариаций магнитного поля, с учетом E_z , показало возможность оценки различных гипотез. В дальнейшем предполагается расширить эксперимент. На Тункинском полигоне и на побережье озера Байкал в настоящее время установлены трехкомпонентные феррозондовые магнитометры. Также получены магнитовариационные данные от ИСЗФ СО РАН еще по двум точкам: база в Узурах (о. Ольхон) и обсерватория в Мондах (Тункинская долина), которые еще предстоит обработать.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант 20-05-00001. Развитие техники эксперимента поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы крупных научных проектов национального проекта Наука, грант 075-15-2020-778.

Результаты, представленные в этой статье, основаны на данных, собранных в обсерватории Иркутск. Мы благодарим ИСЗФ

СО РАН за поддержку ее работы и компанию INTERMAGNET за продвижение высоких стандартов магнитных обсерваторий (www.intermagnet.org).

ЛИТЕРАТУРА

Мороз ЮФ, Мороз ТА, 2012 Глубинный геоэлектрический разрез Байкальского рифта. Вестник КРАУНЦ Науки о Земле, № 2, Вып. 20, с 114–126

Орехова ДА, Кругляков МС, Коротаев СМ, Буднев НМ, 2017 Возможности выбора адекватной геоэлектрической модели Байкальского рифта по наблюдениям в районе эксперимента по глубоководному электромагнитному мониторингу. Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 2. Иркутск: ИГ СО РАН, с 150-159

Korotaev SM, Budnev NM, Serdyuk VO., Orekhova DA, Kruglyakov MS, Kiktenko EO, Mirgazov RR, Zurbanov VL, Gorohov JV, Ryabov EV, 2018 Baikal electromagnetic experiment. Atmospheric and Oceanic Physics, V54, p 1569–1594

Kruglyakov M, Kuvshinov A, 2018 Using high-order polynomial basis in 3-D EM forward modelling based on volume integral equation method. Geophysical Journal International, V213, I2, p 1387-1401