

УДК 550.838.3

ГИДРАТАЦИЯ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ОКЕАНА

© 2017 г. А.М. Городницкий, Ю.В. Брусиловский, А.Н. Иваненко,
К.В. Попов, Н.А. Шишкина, И.А. Веклич

Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН, г. Москва, Россия

Совместный анализ результатов геомагнитных съемок и данных петромагнитного изучения образцов в разных геотектонических зонах Мирового океана свидетельствует, что существенный вклад в аномальное магнитное поле океана наряду с базальтовым слоем вносят глубинные источники, связанные с серпентинитовыми формациями, которые образуются в результате гидратации гипербазитов верхней мантии океанскими водами. Глубина проникновения океанской воды в мантию определяется глубиной залегания поверхности хрупкопластического перехода, где происходит подплавление микротрещин в веществе, деформация которого начинает осуществляться за счет пластического течения. Многочисленные петромагнитные исследования океанических серпентинитов показывают, что основным носителем магнетизма в них является магнетит, составляющий до 5 и более процентов. Магнитные параметры магнетита в серпентинитах определяются не только его количеством, но и формой зерен и характером их распределения.

Рассматриваются четыре морфогенетических типа серпентинитовых массивов, выделенных с учетом условий их формирования в основных морфоструктурах океанического дна: серпентиниты рифтовых зон срединно-океанических хребтов; серпентиниты зон трансформных разломов; серпентиниты зон внутриплитовых асейсмических поднятий; серпентиниты зон субдукции.

Для структур, характерных для каждого типа массивов, путем решения обратной задачи магнитометрии построены компьютерные модели источников магнитных аномалий. Для зон, соответствующих каждому типу массивов, проведен комплексный петрофизический анализ имеющихся образцов. Совместная интерпретация этих данных и результатов других геофизических методов позволила получить убедительные доказательства существования серпентинитовых формаций в различных геотектонических зонах Мирового океана.

Ключевые слова: серпентинизация, естественная остаточная намагниченность, магнитные аномалии, гидратация, внутриплитовые асейсмические поднятия, модель магнитоактивного слоя, эффективная намагниченность, обратная задача, источники аномалий.

Введение

Совместный анализ результатов геомагнитных исследований в разных геотектонических зонах Мирового океана и данных петромагнитного изучения океанической литосферы свидетельствует, что существенный вклад в аномальное магнитное поле океана наряду с базальтовым слоем вносят глубинные источники, связанные с серпентинитовыми массивами, образующимися в результате гидратации гипербазитов верхней мантии океанской водой.

Серпентинизация – широко распространенный процесс постмагматического изменения существенно оливиновых ультраосновных пород, состоящий в замещении первично безводных железисто-магнезиальных силикатов, оливина, ромбического пироксена водным силикатом магния – серпентином. Процесс этот является гидротермальным и происходит в интервале температур 290–400 °С (характеристическая изотерма Хесса). При попадании воды в область таких температур начинается серпентинизация

перидотитов верхней мантии, в результате чего ниже подошвы габбрового слоя наращивается серпентинитовый слой. Вода проникает в мантию по системе трещин сверху, на что указывает изотопный анализ воды в гипербазитовых разновидностях офиолитов [Лобковский, 1988]. При этом железо, частично не вошедшее в состав новообразованного серпентина, выделяется в виде вторичного магнетита [Bazylev, Popov, Shcherbakov, 2002].

Глубина проникновения океанской воды в мантию определяется глубиной залегания поверхности хрупкопластического перехода, где происходит подплавление микротрещин в веществе. При этом новообразованное пластичное вещество становится непроницаемым для воды и пара.

Многочисленные петромагнитные исследования океанических серпентинитов показывают, что основным носителем магнетизма в них является магнетит, составляющий до 5 и более процентов [Bazylev, Popov, Shcherbakov, 2002]. Магнитные параметры магнетита в серпентинитах определяются не только его количеством, но и формой его зерен и характером их распределения.

В соответствии с разными условиями формирования серпентинитовых массивов в основных морфоструктурах океанического дна могут быть выделены четыре основных морфогенетических типа таких образований.

Срединно-океанические хребты. Рифтовые зоны

Многочисленные данные геологического изучения зон срединно-океанических хребтов указывают на широкое распространение серпентинизированных гипербазитов в самых разных районах Мирового океана, например, таких, как осевая часть Срединно-Индийского хребта, рифтовая зона Срединно-Атлантического хребта. При погружениях глубоководных обитаемых аппаратов “Мир” в районе разлома Кейн были обнаружены серпентинитовые протрузии. Мощность базальтового слоя здесь не превышает 600 м, а зафиксированная над бортом рифтовой зоны интенсивная аномалия магнитного поля, по-видимому, связана с выявленной при подводных наблюдениях серпентинитовой протрузией. Остаточная намагниченность образцов, отобранных из обнажения серпентинитов, меняется от 4 до 12 А/м.

Согласно данным гравиметрических съемок, в гребневой части Срединно-Атлантического хребта рифтовые горы изостатически скомпенсированы [Астафурова и др., 1996]. В связи с этим наиболее вероятным процессом, приводящим к их воздыманию, можно считать серпентинизацию, при которой происходит уменьшение плотности ультраосновных пород верхней мантии от 3.3 до 2.7–2.8 г/см³. Судя по поднятию крупных блоков океанической коры, процесс серпентинизации охватывает значительные области под корой на флангах хребта, что приводит к формированию нижнего магнитного слоя коры значительной мощности (рис. 1) [Городницкий, Шишкина, 1996].

Одной из особенностей серпентинизации в медленноспрединговом Срединно-Атлантическом хребте, где установлена корреляция между аномалиями эффективной намагниченности, интегральной плотностью коры и скоростью спрединга [Астафурова и др., 1996], является ее связь с дискретным характером спрединга в режиме медленного разрастания, когда магматическая эруптивная фаза может сменяться сухой тектонической. При замедлении спрединга и смене эруптивной фазы на тектоническую происходит гидратация морской водой по системе трещин гипербазитов верхней мантии непосредственно в осевой части хребта. При этом серпентинизации подвергаются породы не только в рифтовой зоне срединного хребта, но и в зонах его пересечения трансформными разломами.

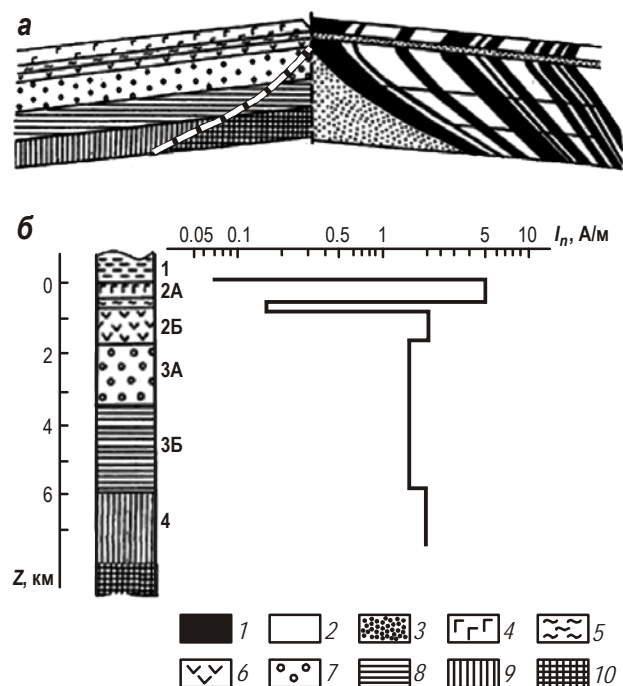


Рис. 1. Модель магнитоактивного слоя в зоне дивергенции: *а* – разрез магнитоактивного слоя; *б* – обобщенный петромагнитный разрез, рядом с которым приведен график распределения намагниченности по глубине. По [Городницкий, Шишкина, 1996] с изменениями

1–3 – блоки: прямонамагниченные (1), обратнонамагниченные (2), слабомагнитные и немагнитные (3); 4–10 – породы: базальты (4), переходная зона (5), дайковый комплекс (6), изотропное габбро (7), кумулятивное габбро и расслоенный комплекс (8), серпентинизированные перидотиты (9), перидотиты мантии (10); белая штриховая линия на *а* – изотерма Кюри 350 °С

Отмеченное выше приводит к образованию узких протрузий, а в отдельных случаях – к формированию протяженного приразломного хребта. Такие процессы могут охватывать обширную область, вызывая поднятие крупных блоков коры шириной в сотни километров. Океаническая кора медленносрединговых хребтов, таким образом, должна иметь блоковое строение и в зависимости от изменения скорости спрединга состоять из участков с серпентинитовым слоем и без него.

Приведенные данные позволяют предположить, что именно процесс серпентинизации, контролируемый в медленносрединговых хребтах понижением скорости спрединга, является основным источником латеральных аномалий рельефа, поля силы тяжести и магнитного поля. Вероятно, появление серпентинитового слоя в океанической коре оказывает влияние на латеральное изменение рельефа, которое ранее связывалось с фазовыми переходами в толще литосферы [Городницкий, 1985].

Зоны трансформных разломов

Многочисленные драгирования, проведённые в зонах трансформных разломов Северной Атлантики (Атлантис, Хейс, Океанограф и разлом 15°20'), а также в пределах Аравийско-Индийского хребта (разломы Витязь, Вима), дали обширный материал, позволивший получить данные о магнитных свойствах гипербазитов [Астафурова и др., 1996]. Драгированные образцы представлены гидротермально изменёнными дунитами, гарцбургитами и лерцолитами разной степени серпентинизации и среднетемпературного метаморфизма. Наиболее магнитными являются серпентинизированные перидотиты разлома Хейс ($I_n=8$ А/м) и разлома Витязь ($I_n=6.8$ А/м). Минимальная намагниченность получена в образцах из разломов Атлантис, Оуэн, и Вима ($I_n=0.6$ А/м) [Попов, Базылев, Щербаков, 2006]. Вариации магнитных параметров исследуемых перидотитов обусловлены как особенностями серпентинизации пород (стадий и степенью), так и степенью предшествовавшего среднетемпературного метаморфизма перидотитов, когда кристаллизация магнетита происходила ещё до серпентинизации перидотитов при температуре 450–600°.

В зоне трансформного разлома Романш в осевой части Срединно-Атлантического хребта при драгировании отобраны образцы ультрабазитов, гипербазитов и дунитов; при удалении от хребта ультрабазиты полностью серпентинизированы. Еще более четко такая же зональность прослеживается вдоль трансформного разлома Вима, где серпентинизированные гипербазиты слагают южный борт грабена, а степень серпентинизации уменьшается вверх по разрезу [Городницкий, Шишкина, 1996].

Получить более детальные представления о механизме и масштабе серпентинизации в зонах медленных срединно-океанических хребтов и трансформных разломов нам позволяют модельные расчеты, выполненные по четырем профилям, расположенным в районе пересечения Срединно-Атлантического хребта (САХ) и разлома $15^{\circ}20'$ (данные из геофизической базы GEODAS) [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/>]. Также был проведен анализ площадных магнитных аномалий на полигоне в зоне пересечения этих структур (данные получены в экспедиции НИС “Академик Николай Страхов”).

Положение полигона, профилей, вдоль которых выполнены модельные расчеты, и геомагнитные разрезы разлома, построенные по результатам моделирования, показаны на рис. 2.

Для решения обратной задачи в плоском варианте использовался комплекс *Linverse2D* [Иваненко и др., 2012], в котором реализованы практически все современные технологии решения таких задач. Вначале с использованием алгоритмов определения особых точек, деконволюции Эйлера и анализа аналитического сигнала аномалий находится геометрия области распределения аномальной намагниченности; при этом привлекается априорная информация – данные о рельефе дна, сейсмические данные. Затем область разбивается на элементарные блоки, решается прямая задача для такой совокупности тел и запускается итерационный процесс решения линейной обратной задачи с контролем заданных свойств решения. В нашем случае использовался гибридный критерий качества получаемых решений – взвешенная сумма их компактности [Last, Kubik, 1983] и четкости границ [Portniaguine, Zhdanov, 1999].

Для анализа площадных аномалий применялись алгоритмы выделения горизонтальных границ источников и оценки глубины до них спектральным методом, методом деконволюции Эйлера и с помощью анализа морфологии аналитического сигнала.

Субширотные профили 1 (~400 км), 2 и 3 (~600 км каждый) пересекают САХ в районе разлома $15^{\circ}20'$. При этом профиль 1 проходит почти на 100 км севернее разлома, профиль 2 – вблизи него (в восточной своей части практически по разлому), профиль 3 – в 60 км к югу от разлома. Субмеридиональный профиль 4 (>300 км) ортогонально пересекает разлом и профили 1–3 примерно по 46° з.д. По всем профилям получены устойчивые решения обратной задачи, основным свойством которых является наличие двух ярусов, к которым приурочены источники наблюдаемых магнитных аномалий.

Первый ярус, подошва которого на рис. 2 отмечена субгоризонтальной черной утолщенной линией, представляет собой “классический” магнитоактивный слой океанской литосферы мощностью 1.5–3 км и характеризуется инверсионной (знакопеременной) структурой намагниченности.

На профилях 1 и 3 наблюдается отчетливая симметрия паттерна намагниченности относительно оси хребта, что позволило уверенно идентифицировать линейные аномалии от 1 до 5 по геохронологической шкале. На профиле 2 уверенная идентификация аномалий с 1 до 4 возможна только в его западной части в месте пересечения с северным сегментом хребта. В восточной же части профиля, где он пересекается с южным сегментом хребта, идентификация весьма неоднозначна.

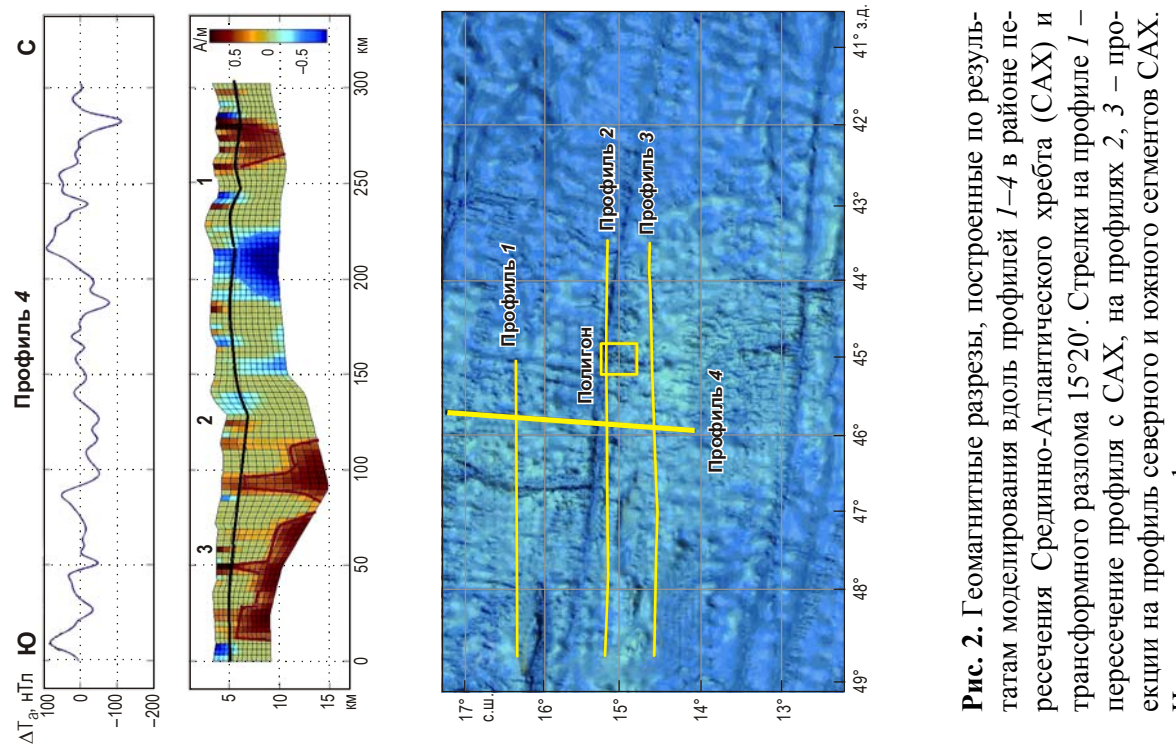
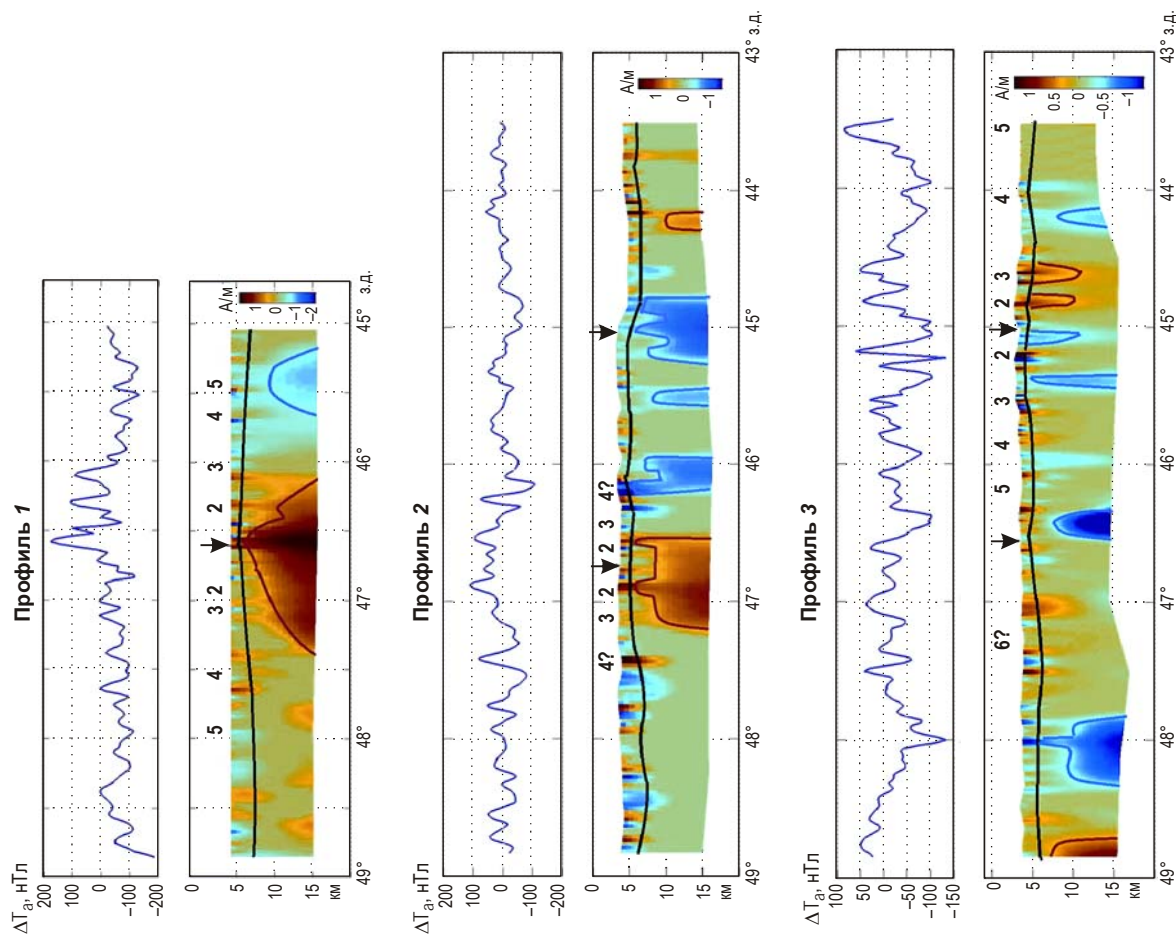


Рис. 2. Геомагнитные разрезы, построенные по результатам моделирования вдоль профилей 1–4 в районе пересечения Срединно-Атлантического хребта (САХ) и трансформного разлома 15°20'. Стрелки на профиле 1 – пересечение профиля с САХ, на профилях 2, 3 – проекции на профиль северного и южного сегментов САХ. Над разрезами графиками аномального магнитного поля



Непосредственно в зоне взаимодействия хребта с трансформным разломом наблюдается более сложная картина распределения по горизонтали источников магнитных аномалий. Скорее всего, это обусловлено нестабильностью во времени положения оси спрединга в рассматриваемой зоне.

Второй ярус, к которому приурочены выделенные источники магнитных аномалий, расположен ниже первого в интервале глубин 3–13 км под поверхностью дна и представлен протяженными по горизонтали (до 100 км) и мощными по вертикали (5–10 км) объектами, намагниченными с одинаковой полярностью. Мы идентифицируем эти выделяемые глубинные объекты как магнитные тела, образовавшиеся в результате процессов среднетемпературного метаморфизма и/или серпентинизации перидотитов, которым сопутствует кристаллизация магнетитов и, соответственно, возникновение вторичной остаточной намагниченности. Площадные магнитные аномалии, изученные на полигоне (рис. 3, *а*) позволяют дополнить интерпретацию оценками, полученными в рамках 3D подхода.

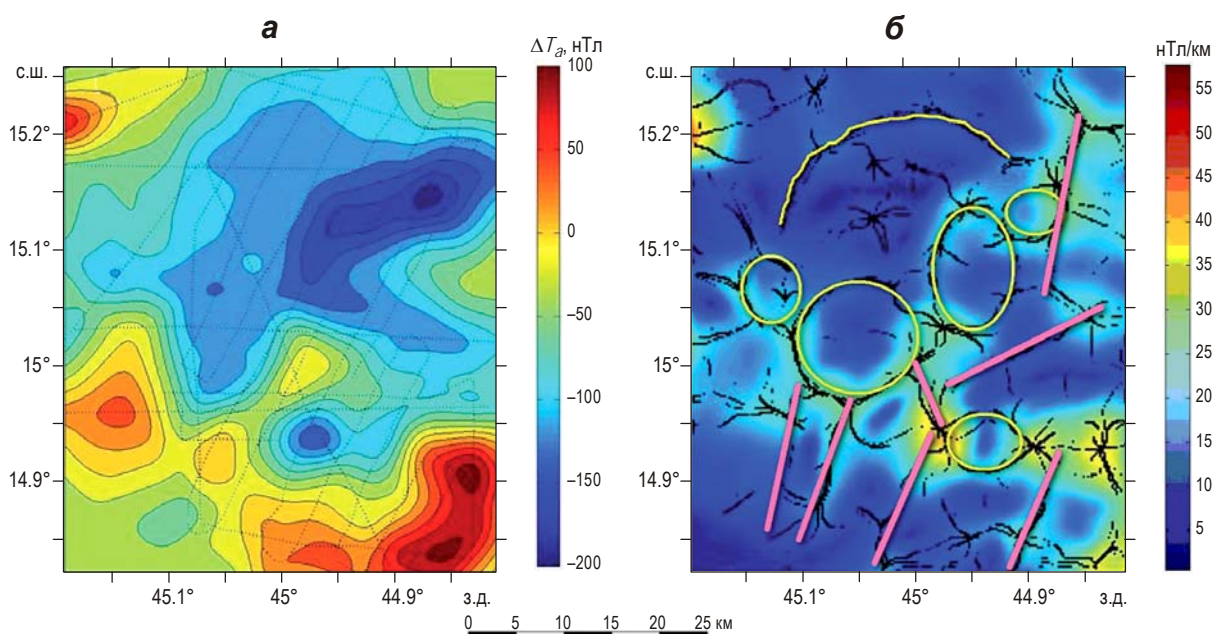


Рис 3. Карты изодинам аномального магнитного поля (*а*) и модуля аналитического сигнала (*б*), построенные для полигона, расположенного вблизи пересечения южного сегмента Срединно-Атлантического хребта и трансформного разлома $15^{\circ}20'$ (см. рис. 2). Желтые и розовые линии на *б* – границы источников магнитных аномалий, выделенные по результатам интерпретации аналитического сигнала

Полигон, расположенный в месте пересечения южного сегмента Срединно-Атлантического хребта и трансформного разлома $15^{\circ}20'$, покрывает площадь 30×50 км. Рельеф полигона представлен линейной вытянутой структурой, осложнённой локальными поднятиями с глубинами от 3500 до 5600 м. Южный сегмент хребта имеет суб-меридиальное простирание и ограничен двумя вытянутыми поднятиями, пересеченными глубокими ложбинами неправильной формы. В северо-восточной части полигона отмечен обширный минимум, достигающий -200 нТл, в юго-восточной наблюдаются фрагменты интенсивной положительной аномалии, превышающей 100 нТл; в юго-западной – локальные изометричные аномалии со значением 50 нТл. Эти аномалии хорошо коррелируют с рельефом – отрицательные сосредоточены в районе пересечения трансформного разлома и хребта, положительные приурочены в основном к вытянутым

поднятиям, идущим вдоль хребта. Это может говорить о том, что существенный вклад в наблюдаемые аномалии вносят морфологические особенности хребта.

Хорошим способом изучения морфологии магнитных аномалий является анализ градиента аномального поля – модулей горизонтального и полного градиентов (так называемый “аналитический сигнал”), которые легко рассчитываются по градам исходных аномалий. Аналитический сигнал служит индикатором планового положения источников магнитных аномалий, отражая их геометрию. Данный подход позволяет без привлечения дополнительных гипотез о природе источников магнитных аномалий получать информацию об их интенсивности и локализации в пространстве. 3D-аналитический сигнал обладает рядом полезных свойств: в плане его максимумы соответствуют центрам магнитных масс изометричных источников или латеральным границам протяженных аномальных тел. Используемая нами процедура позволяет автоматически выделять локальные максимумы аналитического сигнала и/или цепочки таких максимумов, нанося их на карту.

На карте модуля аналитического сигнала и его локальных максимумов, которые мы интерпретируем как выделенные латеральные границы источников аномалий, прослеживаются два геометрических типа таких границ (см. рис. 3, б).

1. Концентрические (квазиколецевые) границы источников диаметром от 7 до 12 км, тяготеющих к поднятиям как на основной оси хребта, так и на его боковой ветви. Такие источники можно интерпретировать как возможные локализации основных центров вулканической активности.

2. Линейные протяженные (длина от 15 до 25 км) границы северного и северо-восточного простирания. Источники этого типа в плане в основном соответствуют гребневым поднятиям хребта или ортогональны им, что хорошо видно при их наложении на карту рельефа. Такие источники могут интерпретироваться как маркеры основных субгоризонтальных магматических каналов.

Средняя глубина до верхней кромки источников аномалий на полигоне оценивается спектральным способом в 3.77 км, что хорошо согласуется со средней глубиной до поверхности дна на полигоне. Средняя мощность магнитоактивного слоя оценивается в 4.5 км, что существенно больше значений, принятых в рамках “классических моделей” [Магнитное ..., 1993; Петромагнитная ..., 1994]. Полученные оценки, на наш взгляд, также можно трактовать в пользу наличия в зоне пересечения Срединно-Атлантического хребта и разлома 15°20' глубинных источников магнитных аномалий, в том числе и связанных с серпентинизацией.

Зоны внутриплитовых асейсмичных поднятий

Непосредственная связь аномалий магнитного поля с серпентинитовым слоем океанической коры зафиксирована в зонах асейсмичных поднятий и внутриплитовой деформации, где в обстановке сжатия формируются покровно-надвиговые структуры в соответствии с механизмом двухъярусной тектоники. Типичный пример таких образований – подводный хребет Горриндж в Северной Атлантике, который входит в систему подводных гор Хосшу, расположенную в восточной части Азоро-Гибралтарской зоны разломов, прослеживающейся от точки тройного сочленения Северо-Американской, Евразийской и Африканской плит в районе Азорских островов на западе до Гибралтарского пролива на востоке. Эта тектоническая структура, являющаяся одной из крупнейших в Северной Атлантике, определяет границу между Евразийской и Африканской плитами.

Геологическое строение и тектоническая эволюция хребта Горриндж представляются сложными. Выявлены породы офиолитового комплекса, включающие серпенти-

низированные перидотиты, габброиды, долериты и толеитовые базальты, а также щелочные вулканиты. Подводные исследования с обитаемых подводных аппаратов и глубоководное бурение [Auzende, Charvet, Le Lann, 1979] показали, что западная вершина хребта (гора Геттисберг) сложена серпентинизированными гарцбургитами и габбро-долеритами, а восточная (гора Ормонд) – габброидами и щелочными базальтами. В результате подводного бурения, проведенного судном “Бавенит” в 1991 г. на горе Геттисберг, получены 50 м керна, целиком представленного апогарцбургитовыми серпентинитами [Матвеенков и др., 1995].

Аномальное магнитное поле над хребтом Горриндж резко расчленено; размах локальных аномалий превышает 700 нТл при периоде 1–1.5 км. Над вершиной Геттисберг отмечена отрицательная магнитная аномалия интенсивностью 400 нТл. В пределах хребта в плане отмечаются два преобладающих направления простирания аномалий – северо-восточное с азимутом 20–30° и ортогональное ему с азимутом 110–130° [Городницкий, Брусиловский, 1996].

Основной магнитный объект в пределах хребта Горриндж в зоне вершины Геттисберг – массивные выходы серпентинизированных гипербазитов, представленных апогарцбургитовыми серпентинитами [Брусиловский, Городницкий, Иваненко, 1993; Городницкий, Брусиловский, 1996; Матвеенков и др., 1995]. Так, средняя естественная намагниченность серпентинитов из скважины, пробуренной в первом рейсе бурового судна “Бавенит” (1991 г.), полученная по 200 измерениям, составила 15 А/м. Главная мода на гистограммах распределения намагниченности, охватывающая более 50 % всех измеренных образцов, лежит в пределах от 1 до 3 А/м [Попов, 1996]. При этом величина фактора Кенигсбергера во всех случаях более 1. Обращает на себя внимание, что в результате магнитной чистки в кернах серпентинитов выделены два преобладающих направления вектора магнитного наклонения: одно, охватывающее около 34 % обследованных образцов, составляет 0–5°, второе (около 20 %) – 17°. Полученные данные указывают на то, что серпентинизация массива Горриндж происходила в два этапа.

Серпентиниты – главный магнитный объект в пределах хребта Горриндж, географическая карта которого представлена на рис. 4, а. Приводимый на рис. 4, б геомагнитный разрез, построен по результатам решения обратной задачи для профилей 1–5, проходящих вкрест простирания хребта.

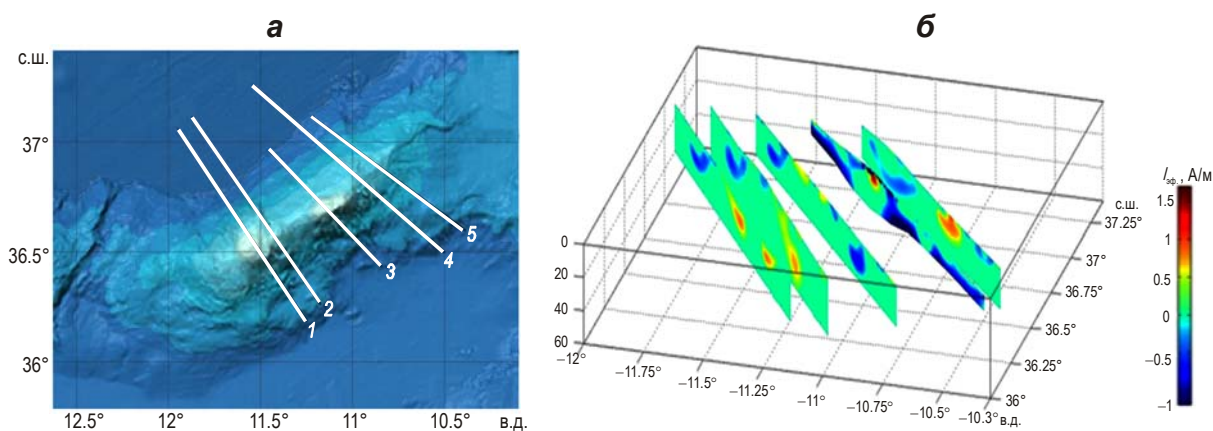


Рис. 4. Положение профилей 1–5 на физиографической карте хребта Горриндж (а) и построенные по ним геомагнитные разрезы (б). Справа шкала значений эффективной намагниченности $I_{эф.}$

В области внутриплитовых деформаций Центральной котловины Индийского океана в нижнем ярусе океанической коры установлен слой со скоростями продольных волн 7.2–7.6 км/с, имеющий мощность 2–5 км, который является зоной пониженной плотности пород и по физическим параметрам соответствует серпентинитам [Непрочнов, Левченко, Кузьмин, 1990]. На рис. 5 приведена модель схематического субмеридионального разреза, иллюстрирующего механизм продвижения серпентинизированных перидотитов по сквозькоревым разломам. Плотностное моделирование свидетельствует о наличии в рассматриваемой области разуплотненного корня с дефицитом плотности 0.05 г/см^3 , дополнительная мощность которого может достигать 5 км. Между трансформными разломами Индира и Индрани выявлено поднятие с необычными геофизическими параметрами. Можно выдвинуть, как минимум, две равноценные гипотезы о природе его формирования.

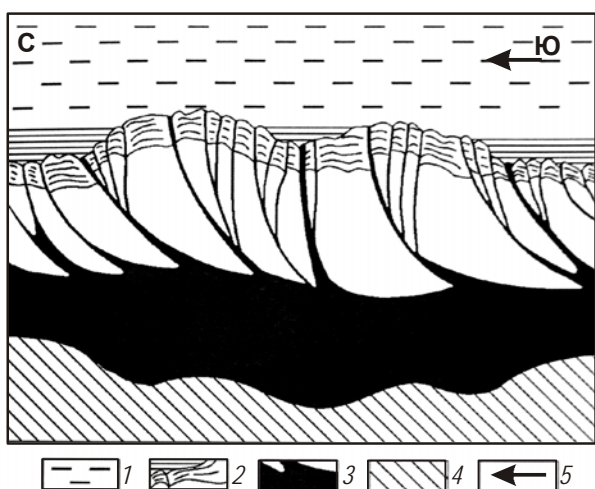


Рис. 5. Схематический разрез зоны тектонических деформаций Центральной котловины Индийского океана по [Вержбицкий, Лобковский, 1993]

1 – вода океана; 2 – осадки и блоки фундамента; 3 – серпентиниты; 4 – мантия; 5 – направление сжатия

Первая гипотеза предполагает образование рассматриваемого поднятия в результате формирования покровно-надвиговых структур в обстановке меридионального сжатия вдоль трансформных разломов, на что косвенно указывает линейный характер аномального магнитного поля вдоль разлома $80^{\circ}30'$ [Городницкий, Валяшко, Пальшин, 1990]. Это поднятие проявляется также и на структурной карте поверхности акустического фундамента [Левченко, Мерклин, Свиридов, 1990].

Согласно второй гипотезе, причиной образования поднятия может служить подъем к поверхности серпентинитовой протрузии в соответствии с механизмом разуплотнения. Сам же слой со скоростями 7.2–7.6 км/с, отнесенный в [Непрочнов, Левченко, Кузьмин, 1990] к разуплотненной верхней мантии, на самом деле является серпентинитовым слоем, вызывающим повышение аномалии магнитного поля. Такой же слой выявлен по сейсмическим данным на профиле между скважинами глубоководного океанского бурения 215 и 218 в районе $2\text{--}2.5^{\circ}$ с.ш. [Curry et al., 1982].

Главная причина возникновения самой области внутриплитовых деформаций в Центральной котловине – коллизия Индо-Австралийской плиты с Евразийской [Лобковский, 1988; Городницкий, Валяшко, Пальшин, 1990], начало которой относится к олигоцену–миоцену. При этом сложенный серпентинитами тонкий нижний слой океанической коры мощностью около 3 км играет роль пластичного слоя, по которому перемещаются вышележащие блоки коры, образуя поднятия по механизму двухъярусной тектоники. Участки аномального утолщения коры, как и выходы на поверхность дна серпентинитовых образований, характеризуются усилением аномалий магнитного поля,

понижением поля силы тяжести и аномально высокой плотностью теплового потока. К этим же областям приурочены эпицентры некоторых внутриплитовых землетрясений. Комплексная интерпретация геофизических материалов позволяет предполагать утолщение коры в блоках внутриплитовых деформаций до 20 км.

Следует подчеркнуть, что формирование как самих этих морфоструктур, так и приуроченных к ним аномальных геофизических полей связано с нижним слоем коры, который представлен разуплотненными серпентинизированными гипербазитами и играет роль “астеносферы” в низах океанической коры. Именно наличие такого слоя делает возможным формирование покровно-надвиговых структур коровых блоков в обстановке сжатия. Происходящее в итоге этого утолщение коры и образование серпентинитовых протрузий в результате ее повышенной проницаемости приводят к увеличению мощности магнитоактивного слоя и соответствующему увеличению интенсивности магнитных аномалий, а также к понижению аномалий силы тяжести, связанному с разуплотнением при серпентинизации. Кроме того, само просачивание серпентинитовых протрузий и диссипативный разогрев соприкасающихся блоков коры влекут за собой возникновение зон аномально высоких плотностей теплового потока.

Зоны субдукции

Как следует из анализа мировой карты литосферных магнитных аномалий [Purucker, Clark, 2010], линейные, параллельные желобу аномальные зоны зафиксированы на Алеутской дуге, южной Аляске, Курилах и в Южной Америке. Они располагаются, как правило, над погружающейся плитой, в том числе и над континентальной корой (Хоккайдо, Южная Америка). Нами процесс серпентинизации в зонах субдукции рассматривается на примере Курильской островной дуги, где авторами совместно с Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН выполнен большой объем геолого-геофизических исследований, включая магнитные [Брусилковский и др., 2012]. В морфоструктурном плане район исследований располагается между островами Итуруп, Уруп и Курило-Камчатским глубоководным жёлобом и включает в себя приостровную борт жёлоба и подводный хребет Витязя, который рассматривался в качестве внешней невулканической дуги в общей системе дуга–желоб, и междуговой прогиб, отделяющий хребет от Курильских островов. По данным геомагнитных съёмки были построены карты аномального магнитного поля для рассматриваемого района (рис. 6).

Наиболее крупная из выявленных аномалий магнитного поля – зона интенсивных знакопеременных аномалий предположительно серпентинитовой природы, вытянутая между фронтом островной дуги и глубоководным желобом. Присутствие в этой зоне локальных положительных аномалий преимущественно изометричной формы может быть связано либо с диапировыми серпентинитовыми горами, либо с наложенным вулканизмом на более позднем этапе активного магмагизма. Далее эта зона прослеживается в районе о. Хоккайдо в виде так называемого “магнитного пояса” [Okubo, Matsunaga, 1994], создаваемого интенсивными положительными магнитными аномалиями.

Источники магнитных аномалий в пределах “магнитного пояса” [Okubo, Matsunaga, 1994; Maekawa et al., 2001; Purucker, Clark, 2010] расположены в интервале глубин ~30–40 км. В связи с этим напрашивается естественный вывод о сходстве природы и механизма образования этих объектов с природой и механизмом серпентинитовых магнитных зон на Алеутской дуге и в других островодужных системах Тихого океана.

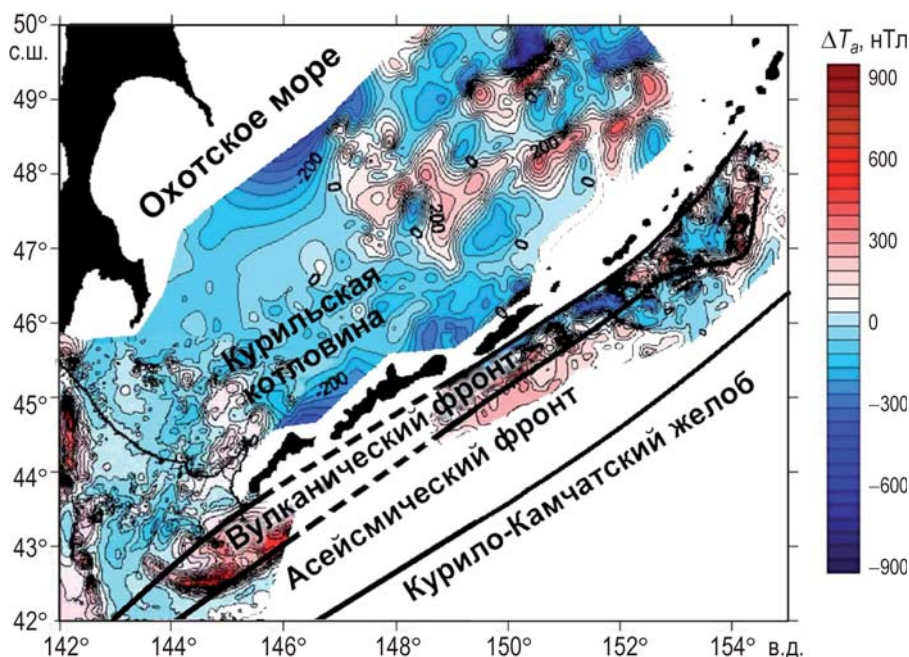


Рис. 6. Карта аномального магнитного поля в зоне субдукции в районе Курильской островной дуги. Сечение изодинам – 100 нТл; сплошные линии – границы основных вулканотектонических структур, штриховые – результаты интерполяции

Для серии аномалий выполнена оценка положения верхних и нижних кромок их источников. Согласно расчёту, сильномагнитное тело предположительно серпентинитового состава локализуется в интервале глубин 20–25 км [Брусиловский и др., 2012]. Полученные данные коррелируются с сейсмическим разрезом по тому же профилю [Piip, Rodnikov, 2004].

Анализ материалов свидетельствует о наличии в зонах субдукции специфической зоны магнитных аномалий, которая, как правило, субпараллельна фронтальной линии подвига и связана, по-видимому, с серпентинитовыми телами, образующимися в результате гидратации перидотитов верхней мантии океанской водой, проникающей по системе трещин в поддвигаемой плите на ее изломе на критической глубине в процессе подвига [Городницкий и др., 2015]. Современные работы [Blakely, Brocher, Wells, 2005; Puruker, Clark, 2010] показывают, что серпентинизированная часть верхней мантии становится магнитной. Поддвигаемая плита на глубине 40–50 км может разбиваться трещинами, по которым проникает океанская вода, и при достижении температуры Хесса происходит серпентинизация с образованием магнетита.

Наряду с гидратацией поддвигаемой плиты океанской водой по системе трещин сверху вниз, происходит также гидратация пород мантии “надвигающейся” плиты в результате дегидратации поддвигаемой плиты. Как следствие, в нижней части “континентальной” плиты образуется магнитный серпентинитовый клин, который отмечается понижением значений поля силы тяжести ввиду его разуплотнения (рис. 7).

Таким образом, интенсивные магнитные аномалии, выявленные в зонах поддвига, служат важным диагностическим признаком зон активной гидратации мантии водой, выпариваемой из поддвигаемой плиты в области дизъюнктивного нарушения. Аналогичные аномалии прослеживаются и в других зонах субдукции вдоль Тихоокеанского огненного кольца [Maekawa et al., 2001].

Одним из примеров представленной на рис. 7 схемы серпентинизации в зоне субдукции является хребет Пекульней, расположенный в Центральной Чукотке.

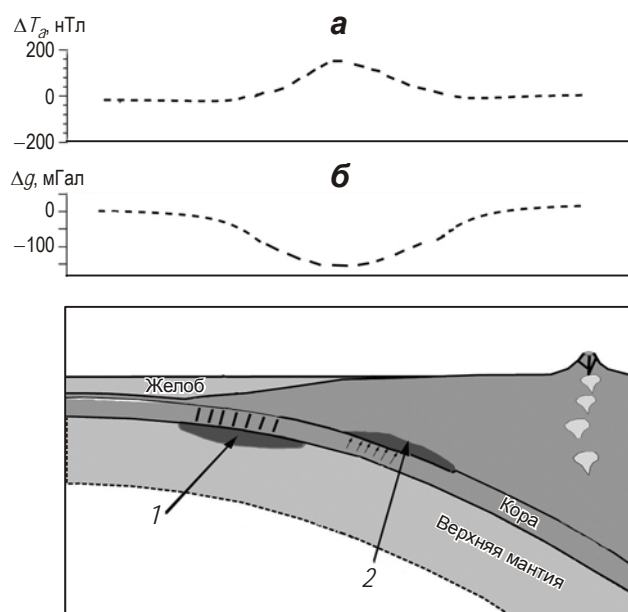


Рис. 7. Схема двух типов серпентинизации в зонах субдукции (внизу): 1 – гидратация верхней мантии океанской водой, проникающей по трещинам в поддвигаемой плите; 2 – гидратация верхней мантии в надвигающейся плите водой, выдавливаемой из поддвигаемой плиты. Над схемой – графики аномального магнитного поля ΔT_a (а) и гравитационной аномалии в редукции Буге Δg (б)

Пекульнейский комплекс в пределах одноименного хребта выделяется при тектоническом районировании в самостоятельный сегмент Западно-Корякской складчатой системы [Bazylev, Ledneva, Ishiwatari, 2013].

В субмеридиональной зоне меланжа в осевой части хребта Пекульней присутствуют тектонические блоки километрового размера, сложенные ортометаморфическими кристаллическими сланцами и амфиболитами с фрагментами полосчатых пластовых тел кумулятивных ультрамафитов, формирование которых происходило предположительно в основании островной или континентальной дуги. Дунитами в телах ультрамафитов сложены отдельные прослои мощностью от десятков до первых сотен метров. Породы, вмещающие тела кумулятивных ультрамафитов, регионально метаморфизованы в эпидот-амфиболитовой фации и несут признаки регрессивного метаморфизма.

Данные петромагнитного анализа образцов свидетельствуют о том, что магнитные характеристики серпентинитов достаточны для создания интенсивных магнитных аномалий в зонах их формирования [Popov et al., 2015].

В свою очередь, поддвигаемая литосферная плита, теряя воду, становится хрупкой и ломкой, и именно здесь могут локализоваться эпицентры наиболее сильных землетрясений, таких, например, как цунамигенное землетрясение на Суматре в 2010 г.

Вдоль осей Идзу-Бонинского и Марианского желобов нередко образуются диапировые серпентинитовые горы [Stokking et al., 1992], механизм формирования которых аналогичен описанному для Центральной котловины Индийского океана.

Можно предполагать, что локальные изометрические магнитные аномалии, выявленные в пределах “серпентинитового” пояса в рейсах НИС “Академик Лаврентьев” [Брусиловский, Баранов, Бабаянц, 2014], также могут быть связаны не с вулканическими постройками, а с серпентинитовыми диапирами.

Более детально строение тел ультрамафитов рассмотрено в работе [Bazylev, Ledneva, Ishiwatari, 2013].

Заключение

Результаты исследований указывают на необходимость детального изучения выявленных областей в зонах субдукции с целью создания геолого-геофизических и геохимических моделей формирования поясов серпентинизации и деструкции подвигаемой плиты, с которыми могут быть связаны сильные, в том числе и цунамигенные, землетрясения [Городницкий и др., 2015].

Полученные результаты позволяют оценить температурный и временной интервал, в котором перидотиты срединно-океанических хребтов приобретают вторичную намагниченность при серпентинизации перидотитов [Bazylev, Popov, Shcherbakov, 2002; Попов, Базилев, Щербаков, 2006]. Поскольку установленный нижний температурный предел серпентинизации океанических перидотитов (и, соответственно, сопутствующей кристаллизации магнетита в них) составляет 100–150 °С [Bonatti et al., 1984], то кристаллизация магнитной фазы в океанических перидотитах может происходить в широком интервале температур (порядка 500 °С). Для перидотитов, воздымающихся в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта и обнажающихся, к примеру, в бортах рифтовой долины, этот процесс занимает порядка 100–200 тыс. лет [Базылев, Силантьев, 2000]. Это время несопоставимо с оценками продолжительности кристаллизации магнетита в ходе серпентинизации офиолитовых перидотитов, составляющими более 2 млн лет [Нгуен, Печерский, 1989]. С одной стороны, это является еще одним аргументом в пользу того, что серпентинизация перидотитов срединных хребтов и серпентинизация офиолитовых перидотитов – совершенно разные процессы, приуроченные к разным геодинамическим обстановкам и различающиеся по своей минералогии, петрологии и геохимии [Bazylev, 2000]. С другой стороны, краткость временного интервала кристаллизации магнетита в перидотитах осевой зоны практически исключает возможность смены полярности геомагнитного поля в ходе этого процесса и, соответственно, присутствия в одном образце зерен ферритмагнетика с намагниченностью разной полярности. Однако следует отметить, что остывание перидотитов, залегающих в верхах литосферной мантии на флангах срединных хребтов и в пределах океанического ложа, должно происходить существенно медленнее, в связи с чем и времени для приобретения этими породами вторичной намагниченности может потребоваться существенно больше.

Всё вышеприведенное свидетельствует о том, что гидратация верхней мантии является важным фактором, формирующим серпентинитовые массивы, которые вносят существенный вклад в аномальное магнитное поле во всех океанических областях.

Вместе с тем повсеместное распространение серпентинитов вообще пока не доказано. Неясен и характер их распределения – сплошной ли это слой или блоки, протрузии и т.д. Вопрос осложняется практической недоступностью нижнего слоя океанической коры для геологического изучения. О наличии серпентинитов можно судить только по материалам исследования зон трансформных разломов, осевых частей медленнопрединговых хребтов и асейсмичных поднятий, а также по косвенным геофизическим признакам их наличия в низах коры [Puruker, Clark, 2010].

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 0149-2014-0031.

Литература

Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Мащенко С.П. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры Срединно-Атлантического хребта и прилегающих

- котловин в пределах Канаро-Багамского геотраверса. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры. М.: Изд-во ВНИРО, 1996. С.171–202.
- Базылев Б.А., Силантьев С.А.* Геодинамическая интерпретация субсолидусной перекристаллизации мантийных шпинелевых перидотитов // *Петрология*. 2000. Т. 8, № 3. С.227–240.
- Брусиловский Ю.В., Баранов Б.В., Бабаянц П.С.* Анализ магнитного поля фронтальной области центральной части Курильской островной дуги // *Геофизические исследования*. 2014. Т. 15, № 3. С.8–12.
- Брусиловский Ю.В., Городницкий А.М., Иваненко А.Н.* Геомагнитное изучение подводных гор. Магнитное поле океана. М.: Наука, 1993. С.231–233.
- Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Жуковин А.Ю., Цовбун Н.М.* Геомагнитное изучение центральной части Курило-Камчатской островной дуги // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С.114–120.
- Вержбицкий Е.В., Лобковский Л.И.* Аномальный геотермический режим Центральной и Аравийской котловин Индийского океана // *Физика Земли*. 1993. № 11. С.16–26.
- Городницкий А.М.* Строение океанской литосферы и формирование подводных гор. М.: Наука, 1985. 166 с.
- Городницкий А.М., Брусиловский Ю.В.* Природа магнитных аномалий и строение океанической коры в зонах асейсмичных хребтов и внутриплитовых дислокаций // *Природа магнитных аномалий и строение океанической коры*. М.: Изд-во ВНИРО, 1996. С.203–242.
- Городницкий А.М., Шишкина Н.А.* Обобщенная петромагнитная модель океанской литосферы // *Природа магнитных аномалий и строение океанической коры*. М.: Изд-во ВНИРО, 1996. С.243–252.
- Городницкий А.М., Валяшко Г.М., Пальшин Н.А.* Аномальное магнитное поле. Геофизические поля и строение дна океанических котловин. М.: Наука, 1990. С.48–61.
- Городницкий А.М., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Попов К.В., Шишкина Н.А.* Гидратация литосферы и магнитное поле океана // *Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции по морской геологии*. М.: ГЕОС, 2015. Т. 5. С.71–75.
- Иваненко А.Н., Брусиловский Ю.В., Филин А.М., Шишкина Н.А.* Современные технологии обработки и интерпретации магнитных данных при поиске нефти и газа на акваториях // *Геофизика*. 2012. № 3. С.60–70.
- Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Свиридов Н.Н.* Строение осадочной толщи и рельеф фундамента глубоководных котловин Атлантического и Индийского океанов. Геофизические поля и строение дна океанических котловин. М.: Наука, 1990. С.108–119.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 230 с.
- Магнитное поле океана. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Матвеенков В.В., Горшков А.Г., Попов К.В., Сафрошкин В.Ю.* Магнитные свойства серпентинитов хребта Горриндж (северо-восточная Атлантика) // *Океанология*. 1995. Т. 35, № 5. С.755–764.
- Нгуен Т.К.Т., Печерский Д.М.* Серпентиниты как возможный источник линейных магнитных аномалий // *Изв. АН СССР. Сер. Геол.* 1989. № 1. С.61–67.
- Непрочнов Ю.П., Левченко О.В., Кузьмин П.Н.* Комплексная геолого-геофизическая характеристика океанских котловин. Геофизические поля и строение дна океанических котловин. М.: Наука, 1990. С.191–200.
- Петромагнитная модель литосферы. Киев: Наукова думка, 1994. 174 с.
- Попов К.В.* Петромагнитные характеристики пород океанической коры. Серпентиниты. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры. М.: Изд-во ВНИРО, 1996. С.82–131.
- Попов К.В., Базылев Б.А., Щербаков В.П.* Температурный интервал возникновения намагниченности океанических шпинелевых перидотитов // *Океанология*. 2006. Т. 46, № 2. С.278–286.
- Auzende J.M., Charvet J., Le Lann A.* Le bank de Gorrindge: Resultats de la champagne CYAGOR // *Dull. Soc. Geol. France*. 1979. V. 21. N 5. P.545–556.

- Bazylev B.A.* Awaruite containing mineral association abundance in peridotite of the fault zone 15°20' (the Atlantic Ocean) as one of the manifestations of oceanic metamorphism // *Russ. J. Earth Sci.* 2000. V. 2, N 3. P.279–293. (in Russian). doi: 10.2205/2000ES000045.
- Bazylev B.A., Ledneva G.V., Ishiwatari A.* Highpressure ultramafics in the lower crustal rocks of the Pekul'ney Complex, central Chukchi Peninsula. 2. Internal structure of blocks and ultramafic bodies, geologic and geodynamic setting of rock formation // *Petrology*. 2013. V. 21, N 4. P.336–350. doi: 10.1134/S0869591113040024.
- Bazylev B.A., Popov K.V., Shcherbakov V.P.* Petrographic features of oceanic peridotites as reflected by their magnetic characteristics // *Russ. J. Earth Sci.* 2002. N 4. P.211–223. doi: 10.2205/2002ES000087.
- Bazylev B.A., Ledneva G.V., Kononkova N.N., Ishiwatari A.* High-pressure ultramafics in the lower crustal rocks of the Pekul'ney Complex, central Chukchi Peninsula. 1. Petrography and mineralogy // *Petrology*. 2013. V. 21, N 3. P.221–248. doi: 10.1134/S0869591113030028.
- Blakely R., Brocher T., Wells R.* Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology*. 2005. N 33. P.445–448. doi: 10.1130/G21447.
- Bonatti E., Lawrence Y.R., Morandi N.* Serpentinization of oceanic peridotites: temperature dependence of mineralogy and boron contents // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1984. N 70. P.88–94.
- Curray J.R., Emmel F.J., Moore D.G., Raitt R.M.* Structure, tectonics and geological history of the northeastern Indian Ocean // *The ocean basins and margins*. 1982. N 6. P.339–450. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas>
- Last B.J., Kubik K.* Compact gravity inversion // *Geophysics*. 1983. N 48. P.713–721.
- Maekawa H., Yamanoto K., Teruaki I., Ueno T., Osada Y.* Serpentine Sea mounts and Hydrated Mantle Wedge in the Izu-Bonin and Mariana Forearc Regions // *Bull. Earthq., Res. Inst. Univ. Tokyo*. 2001. V. 76. P.355–366.
- Okubo Y., Matsunaga T.* Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P.363–371.
- Piip V.B., Rodnikov G.* The Sea of Okhotsk crust from deep seismic sounding data // *Russian journal of earth sciences*. 2004. V. 6, N 1. P.1–14.
- Popov K.V., Bazylev B.A., Shcherbakov V.P., Tsel'movich V.A., Kononkova N.N.* Thermomagnetic analysis of ultramafic rocks: A case study of dunite from the Pekul'ney Complex, Chukotka, NE Russia // *Russ. J. Earth Sci.* 2015. V. 15. ES1003. doi: 10.2205/2015ES000547.
- Purucker M., Clark D.* Mapping and interpretation of lithospheric magnetic field. IAGA Div.5 Book Chapter Springer. 2010. P.1–20.
- Portniaguine O., Zhdanov M.S.* Focusing geophysical inversion images // *Geophysics*. 1999. V. 64. P.874–887.
- Stokking L.B., Merrill D.L., Haston R.B., Ali J.R., Saboda K.L.* Rock magnetic studies of serpentinite seamounts in the mariana and Izu-Bonin regions // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 1992. V. 125. P.561–579.

Сведения об авторах

ГОРОДНИЦКИЙ Александр Моисеевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: gorodnit@yandex.ru

БРУСИЛОВСКИЙ Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: ura77777@rambler.ru

ИВАНЕНКО Александр Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: ivanenko.ocean@gmail.com

ПОПОВ Константин Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: popov@ocean.ru

ШИШКИНА Наталия Андреевна – научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 369. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: shish4646@mail.ru

ВЕКЛИЧ Илья Андреевич – аспирант, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: Brooklyn_zooo@mail.ru

HYDRATION OF THE LITHOSPHERE AND OCEANIC MAGNETIC FIELD

A.M. Gorodnitskiy, Yu.V. Brusilovskiy, A.N. Ivanenko,
K.V. Popov, N.A. Shishkina, I.A. Veklich

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A joint analysis of the results of geomagnetic surveys and the data of petromagnetic study of samples from different geotectonic zones of the World Ocean indicates that, along with the basaltic layer, deep sources, which are associated with serpentinite formations, make an important contribution to the anomalous magnetic field of the ocean. These formations are formed as a result of hydration by the oceanic water of hyperbasites of the upper mantle. The depth of penetration of oceanic water into the mantle is determined by the depth of the surface of the elastic-plastic transition, where the microcracks in the substance are melted, and its deformation begins to occur due to plastic flow. Numerous petromagnetic studies of oceanic serpentinites show that the main carrier of magnetism in them is magnetite, amounting to 5% or more. The magnetic parameters of magnetite in serpentinites are determined not only by its quantity, but also by the shape of its grains and by the nature of their distribution.

According to different conditions of formation of serpentinite massifs in the main morphostructures of the ocean floor, four main morphogenetic types of such formations are distinguished: serpentinites of rift zones of mid-oceanic ridges, serpentinites of zones of transform faults, serpentinites of zones of intra-plate aseismic uplifts, and serpentinites of subduction zones.

Based on the solution of the inverse magnetic problem, computer models of the sources of magnetic anomalies are constructed for the typical structures from all these zones. A complex petrophysical analysis of the available samples was also carried out. On the basis of a joint interpretation of these data with the results of other geophysical methods, convincing evidence for the existence of serpentinite formations in various geotectonic zones of the World Ocean has been obtained.

Keywords: serpentinitization, natural residual magnetization, magnetic anomalies, hydration, intraplate aseismic uplifts, magnetic layer model, effective magnetization, inverse problem, sources of anomalies.

References

- Astafurova E.G., Gorodnitskiy, A.M., Lukyanov S.V., and Masenkov S.P. Nature of magnetic anomalies and structure oceanic crust Mid-Atlantic ridge and adjacent basins within Canaro Bahamas geotraverse. *Priroda magnitnykh anomalii i stroenie okeanicheskoi kory* (Nature of magnetic anomalies and structure of oceanic crust), Moscow: VNIRO, 1996, pp. 171-202.
- Auzende J.M., Charvet J., and Le Lann A. Le bank de Gorrindge: Resultats de la champagne CYAGOR, *Dull. Soc. Geol. France*, 1979, vol. 21, no. 5, pp. 545-556.
- Bazylev B.A. Awaruite containing mineral association abundance in peridotite of the fault zone 15°20' (the Atlantic Ocean) as one of the manifestations of oceanic metamorphism, *Russ. J. Earth Sci.*, 2000, vol. 2, no. 3, pp. 279-293, doi: 10.2205/2000ES000045.

- Bazylev B.A., Ledneva G.V., and Ishiwatari A. Highpressure ultramafics in the lower crustal rocks of the Pekul'ney Complex, central Chukchi Peninsula. 2. Internal structure of blocks and ultramafic bodies, geologic and geodynamic setting of rock formation, *Petrology*, 2013, vol. 21, no. 4, pp. 336-350. doi: 10.1134/S0869591113040024.
- Bazylev B.A., Ledneva G.V., Kononkova N.N., and Ishiwatari A. High-pressure ultramafics in the lower crustal rocks of the Pekul'ney Complex, central Chukchi Peninsula. 1. Petrography and mineralogy, *Petrology*, 2013a, vol. 21, no. 3, pp. 221-248. doi: 10.1134/S0869591113030028.
- Bazylev B.A., Popov K.V., and Shcherbakov V.P. Petrographic features of oceanic peridotites as reflected by their magnetic characteristics, *Russ. J. Earth Sci.*, 2002, no. 4, pp. 211-223. doi: 10.2205/2002ES000087.
- Bazylev B.A. and Silant'ev S.A. Geodynamic interpretation subsolidus recrystallization of mantle spinel peridotites, *Petrology*, 2000, vol. 8, no. 3, pp. 227-240.
- Blakely R., Brocher T., and Wells R. Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle, *Geology*, 2005, no. 33, pp. 445-448. doi: f10.1130/G21447.
- Bonatti E., Lawrence Y.R., and Morandi N. Serpentinization of oceanic peridotites: temperature dependence of mineralogy and boron contents, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, no. 70, pp. 88-94.
- Brusilovsky Yu.V., Baranov B.V., and Babayants P.S. Analysis of the magnetic field frontal region of the Central part of the Kuril island arc, *Geophys. research*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 8-12.
- Brusilovsky Yu.V., Gorodnitsky A.M., and Ivanenko A.N. Geomagnetic study of seamounts. *Magnitnoe pole okeana* (The magnetic field of the ocean), Moscow: Nauka, 1993, pp. 231-233.
- Brusilovsky Yu.V., Ivanenko A.N., Zhukovin A.Yu., and Tsovbun N.M. Geomagnetic study of the Central part of the Kuril-Kamchatka island arc, *Tikhoookeanskaya Geologiya*, 2012, vol. 31, no. 6, pp. 114-120.
- Curray J.R., Emmel F.J., Moore D.G., and Raitt R.M. Structure, tectonics and geological history of the north-eastern Indian Ocean, *The ocean basins and margins*, 1982, no. 6, pp. 339-450. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas>.
- Gorodnitsky A.M. *Stroenie okeanskoi litosfery i formirovanie podvodnykh gor* (Structure of oceanic lithosphere and the formation of seamounts), Moscow: Nauka, 1985.
- Gorodnitsky A.M. and Brusilovsky Yu.V. The nature of magnetic anomalies and structure of oceanic crust in the zones of aseismic ridges and inner plate dislocations, *Priroda magnitnykh anomalii i stroenie okeanicheskoi kory* (Nature of magnetic anomalies and structure of oceanic crust), Moscow: VNIRO, 1996, pp. 203-242.
- Gorodnitsky A.M. and Shishkina N.A. Generalized petromagnetic model of oceanic lithosphere, *Priroda magnitnykh anomalii i stroenie okeanicheskoi kory* (Nature of magnetic anomalies and structure of oceanic crust) Moscow: VNIRO, 1996, pp. 243-252.
- Gorodnitsky A.M., Valyachko G.M., and Palshin N.A. Anomalous magnetic field. *Geofizicheskie polya i stroenie dna okeanicheskikh kotlovin* (Geophysical fields and structure of the bottom of oceanic basins. Moscow: Nauka. 1990, pp. 48-61.
- Gorodnitsky A.M., Brusilovsky Yu.V., Ivanenko A.N., Popov K.V., and Shishkina N.A. Gidratation of the lithosphere and the magnetic field of the ocean, *Geologiya morei i okeanov* (Geology of seas and oceans), Proc. XXI Int. Conf. on marine Geology, Moscow: GEOS, 2015, vol. 5, pp. 71-75.
- Ivanenko A.N., Brusilovsky Yu.V., Filin A.M., Shishkina N.A. Modern technologies of processing and interpretation of magnetic data when searching for oil and gas in the sea areas, *Geophysics*, 2012, no. 3, pp. 60-70.
- Levchenko O.V., Merklin L.R., and Sviridov N.N. The structure of sedimentary strata and topography of the Foundation of the deep-sea basins of the Atlantic and Indian ocean, *Geofizicheskie polya i stroenie dna okeanicheskikh kotlovin* (Geophysical fields and structure of the bottom of oceanic basins. Moscow: Nauka, 1990, pp. 108-119.
- Last B.J. and Kubik K. Compact gravity inversion, *Geophysics*, 1983, no. 48, pp. 713-721.
- Lobkovsky L.I. *Geodinamika zon spreadinga, subduksii i dvukhyarusnaya tektonika plit* (Geodynamics of spreading zones, subduction and plate tectonics bunk), Moscow: Nauka, 1988.
- Maekawa, H., Yamanoto, K., Teruaki, I., Ueno, T., and Osada, Y. Serpentinite Sea mounts and Hydrated Mantle Wedge in the Izu-Bonin and Mariana Forearc Regions, *Bull. Earthq., Res. Inst. Univ. Tokyo*, 2001, vol. 76, pp. 355-366.
- Magnitnoe pole okeana* (The magnetic field of the ocean), Moscow: Nauka, 1993.
- Matveenkov V.V., Gorshkov A.G., Popov K.V., and Safroshkin V.Y. Magnetic properties of serpentinites of the Goringe ridge (North East Atlantic), *Oceanology*, 1995, vol. 35, no. 5, pp. 755-764.
- Nguyen T.K.T. and Pechersky D.M. Serpentinites as a possible source of linear magnetic anomalies, *Izv. USSR Ac. Sci. Ser. GEOL.*, 1989, no. 1, pp. 61-67.
- Neprochnov Y.P., Levchenko O.V., and Kuzmin P.N. Integrated geological and geophysical characteristics of the ocean basins. *Geofizicheskie polya i stroenie dna okeanicheskikh kotlovin* (Geophysical fields and structure of the bottom of oceanic basins. Moscow: Nauka, 1990, pp. 191-200.

- Okubo Y. and Matsunaga T. Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity, *J. Geophys. Res.*, 1994, vol. 99, pp. 363-371.
- Petromagnitnaya model litosfery* (Petromagnetic model of the lithosphere), Kiev: Naukova Dumka, 1994.
- Piip V.B. and Rodnikov G. The Sea of Okhotsk crust from deep seismic sounding data, *Russ. J. Earth Sci.*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 1-14.
- Popov K.V. Petromagnetic characteristics of the rocks of the oceanic crust. Serpentinite, *Priroda magnitnykh anomalii i stroenie okeanicheskoi kory* (Nature of magnetic anomalies and structure of oceanic crust) Moscow: VNIRO, 1996, pp. 82-131.
- Popov K.V., Bazylev B.A., and Shcherbakov V.P. Temperature interval of occurrence of the magnetization of oceanic spinel peridotite, *Oceanology*, 2006, vol. 46, no. 2, pp. 278-286.
- Popov K.V., Bazylev B.A., Shcherbakov V.P., Tsel'movich V.A., and Kononkova N.N. Thermomagnetic analysis of ultramafic rocks: A case study of dunite from the Pekul'ney Complex, Chukotka, NE Russia, *Russ. J. Earth Sci.*, 2015, vol. 15. ES1003. doi: 10.2205/2015ES000547.
- Portniaguine O. and Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images, *Geophysics*, 1999, vol. 64, pp. 874-887.
- Purucker M. and Clark D. Mapping and interpretation of lithospheric magnetic field, *IGA Div.5 Book Chapter Springer*, 2010, pp. 1-20.
- Stokking L.B., Merrill D.L., Haston R.B., Ali J.R., and Saboda K.L. Rock magnetic studies of serpentinite seamounts in the mariana and Izu-Bonin regions, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1992, vol. 125, pp. 561-579.
- Verzhbitskii E.V. and Lobkovskii L.I., Anomalous geothermal regime of the Central and Arabian basins of the Indian Ocean, *Izv. Phys. Solid Earth*, 1993, no. 1, pp. 16-26.