

## ГИДРАТАЦИЯ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ И ТЕКТОНИКА ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ

Городницкий А.М., Шишкина Н.А.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [gorodnit@yandex.ru](mailto:gorodnit@yandex.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.11.2018, одобрена к печати 01.12.2018

Совместный анализ результатов геолого-геофизических исследований океанической литосферы и современных моделей теоретической геодинамики позволяет выделить три основных типа гидратации гипербазитов верхней мантии океанской водой с их последующей серпентинизацией. К первому типу относится фронтальная гидратация, билатеральная по отношению к осевым зонам срединных хребтов на их флангах по системе микротрещин, которая приводит к формированию в низах коры пластичного серпентинитового слоя мощностью около 2 км. Это приводит к образованию в зонах сжатия покровно-надвиговых структур. Второй тип связан с проникновением океанской воды в зонах растяжения по крупным сквозькоровым трещинам в верхнюю мантию, где серпентинизация лимитируется глубиной изотермы Хесса. В этом случае в бортах разломов формируются субвертикальные протрузии и силлы. Пониженная плотность серпентинитов стимулирует субвертикальный подъем вышележащих блоков коры. К третьему типу относится сложный процесс образования серпентинитов в зонах субдукции в пододвигающейся плите при гидратации океанской водой сверху и в надвигающейся плите в результате дегидратации снизу. Дегидратация пододвигающейся океанской плиты делает ее хрупкой и может стимулировать сильные землетрясения. Серпентинитовые образования имеют высокую намагниченность и вносят существенный вклад в аномальное магнитное поле в океанических областях.

**Ключевые слова:** Тектоника, верхняя мантия, океаническая кора, гипербазиты, серпентинизация, срединные хребты, трансформные разломы, магнитное поле, поле силы тяжести, тепловой поток, магнитное моделирование, зоны субдукции, изостазия

Согласно современным геодинамическим моделям формирования океанической литосферы (Лобковский, 1988), в процессе спрединга, при проникновении океанской воды по трещинам в область характеристических изотерм Хесса (350–400°C), начинается серпентинизация гипербазитов верхней мантии с образованием антигоритовой и лизардит-хризатилловой модификаций серпентинитов. Изотопный анализ воды в офиолитовых комплексах показывает, что океанская вода проникает в мантию сверху. Глубина ее проникновения лимитируется глубиной залегания поверхности хрупко-пластического перехода, где вещество становится пластичным. В нем происходит подплавление микротрещин, и оно становится непроницаемым для воды и пара. Этот переход из хрупкого в пластическое состояние происходит в интервале давлений 150–260 МПа при температуре около 350°C.

Совместный анализ результатов геолого-геофизических исследований океанической литосферы и современных моделей теоретической геодинамики

позволяет выделить три основных типа гидратации верхней мантии и ее серпентинизации.

Первый и основной тип – фронтальная билатеральная серпентинизация при гидратировании океанской водой молодой новообразованной литосферы по системе микротрещин на флангах срединного хребта и в примыкающей котловине (рис. 1). Петельчатая структура новообразованных серпентинитов отражает спокойные тектонические условия их формирования в однородной среде, что соответствует океанической литосфере, не нарушенной тектоническими деформациями. На глубине подошвы габбрового слоя давление примерно 150 МПа, а давление 260 МПа, связанное с закупориванием микротрещин в петельчатых серпентинитах, соответствует границе, расположенной на 2 км глубже. Таким образом, к слою габбро (7) должен наращиваться снизу слой серпентинитов мощностью примерно 2 км (10). Он полностью непроницаем для воды, и поэтому его мощность далее не увеличивается (Николаевский, 1979). При этом резко понижается плотность пластичного серпентинитового слоя (от 3,3 до 2,6 г/см<sup>3</sup>) и скорость прохождения сейсмических волн (6,2–6,8 км/с), что имеет важные тектонические следствия.

Поскольку нижний серпентинитовый слой океанической коры является труднодоступным для геологического изучения, его наличие в низах коры, не нарушенной разломами, может быть диагностировано геофизическими методами. Так положение о наращивании океанической коры с возрастом подтверждается сейсмическими данными о ее утолщении на 1,5–2,0 км в интервале 0–40 млн. лет. В ряде районов Тихого океана, в том числе на плите Кокос, в низах коры обнаружен слой пониженных сейсмических скоростей (6,8 км/с) с мощностью 2 км (Levis,

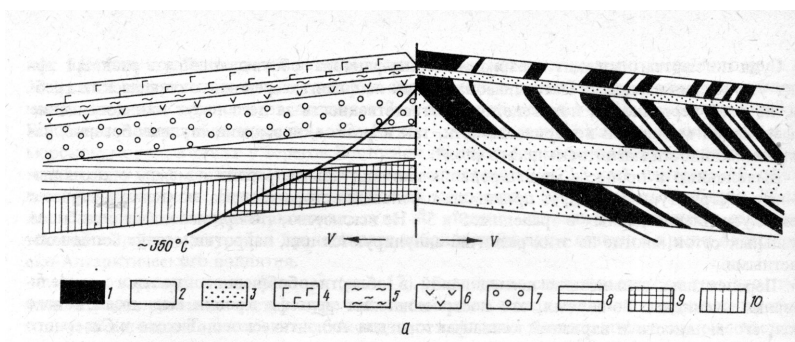


Рис. 1. Схема фронтальной билатеральной гидратации верхней мантии на склонах срединного хребта и в примыкающей котловине: блоки 1 – пряномагнитные, 2 – обратно намагнитные, 3 – слабомагнитные и немагнитные, 4 – толеитовые базальты, 5 – переходная зона, 6 – дайковый комплекс, 7 – изотропные габбро, 8 – кумулятивные габбро и расслоенный комплекс, 9 – перидотиты, 10 – серпентинизованные перидотиты.

1978). По данным Фокса и Апдайка, которые анализировали величины сейсмических скоростей в низах коры для главных котловин Мирового океана, из 243 определений более половины измеренных определений скоростей находится в интервале 6,2–6,8 км/с (Fox, Opdyke, 1973).

Билатеральная фронтальная симметрия гидратации верхней мантии океанической литосферы относительно осей срединных хребтов подтверждается также геомагнитными данными (Гордин, Городницкий, 1994, Назарова, Городницкий, 1986). Как показывают результаты геомагнитных съемок, для океанической литосферы с возрастом 30 млн. лет и более наблюдается закономерное увеличение размаха линейных аномалий. Петромагнитные исследования океанических базальтов из сейсмического слоя 2А свидетельствуют о том, что их первичная намагниченность с возрастом резко снижается. Происходит это в результате проникновения в верхний базальтовый слой океанской воды, что приводит к низкотемпературному однофазному окислению титаномагнетита. Увеличение размаха магнитных аномалий поэтому может быть связано с серпентинитовым слоем. Так в наиболее древней по возрасту литосфере Северо-Западной котловине Тихого океана установлена высокая интенсивность линейных магнитных аномалий мезозойской шкалы, несмотря на малую величину намагниченности образцов, отобранных из базальтового слоя (Линькова, Райкевич, 1989). Существование в низах коры магнитного серпентинитового слоя подтверждается также приведенными выше результатами магнитного моделирования в глубоководных котловинах и на асейсмичных поднятиях, которые свидетельствуют о том, что мощность магнитоактивного слоя в океанической литосфере соответствует мощности коры. (Природа магнитных аномалий, 1996).

Интенсивная фронтальная серпентинизация гипербазитов верхней мантии на флангах Срединно-Атлантического хребта нашла подтверждение в результатах интерпретации результатов гравиметрических съемок (Городницкий, Федорова, 1991). Как показало плотностное моделирование, билатеральное увеличение размаха линейных магнитных аномалий с 30 млн. лет сопровождается понижением средней расчетной интегральной плотности коры.

Серпентинитовый слой в низах коры, в ненарушенных разломами участках океанической литосферы, был обнаружен при глубоководном бурении бурового судна «Гломар Челленджер» в зоне САХ (37 и 45 рейсы). В скважине 395, к западу от Срединно-Атлантического хребта, в зоне линейной аномалии 4, на 23°с.ш., под 59-метровой толщей базальтов, было вскрыто серпентинитовое тело мощностью несколько метров. В зонах асейсмичных поднятий и внутриплитовых дислокаций также установлены непосредственные выходы магнитного серпентинитового слоя к поверхности, там, где в режиме сжатия формируются покровно-надвиговые структуры по механизму двухъярусной тектоники (Лобковский, 1994).

Второй тип серпентинизации связан с гидратацией верхней мантии по крупным сквозькоровым разломам и трещинам, к которым относятся рифтовые долины медленно-спрединговых хребтов и трансформные разломы. Глубина гидратации в этом случае значительно больше и лимитируется только глубинным положением изотермы Хесса, (до 30 км). Это может приводить к образованию глубинных «серпентинитовых корней» в трогах трансформных разломов с тангенциальным раскрытием, а также серпентинитовых протрузий и силлов

в бортах крупных разломов и рифтовой долины. Наличие серпентинитовых корней косвенно подтверждается данными геомагнитной и гравиметрической съемок в тех зонах трансформных разломов Атлантического и Тихого океанов, где отмечается сдвиг с тангенциальным растяжением (рис. 2).

К ним относятся трансформные разломы Кейн и Атлантис в Атлантическом океане, Хизена и Мендосино в Тихом океане (Магнитное поле океана, 1993). Под ними обнаруживаются разуплотненные серпентинитовые магнитные корни до глубин 12–15 км (Линькова и др., 1982).

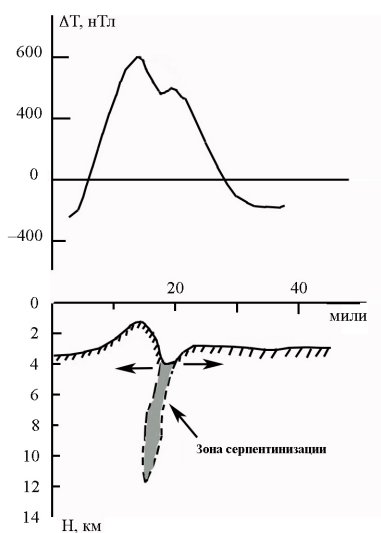


Рис. 2. Схема глубинной гидратации по крупным сквозькоровым трещинам с образованием «серпентинитовых корней» (трансформный разлом Хизена, Тихий океан).

Серпентинитовые протрузии непосредственно в рифтовой долине Срединно-Атлантического хребта были обнаружены при погружениях подводного аппарата «Мир» в 1988 г. при изучении осевой части хребта между 24 и 26° с.ш. (Зоненшайн и др., 1989).

Формирование крупных разуплотненных серпентинитовых массивов в бортах рифтовой долины в ряде случаев приводит к асимметрии ее бортов при изостатической компенсации. Так детальные исследования в районе TAG (Trans Atlantic Geotravers) установили, что восточный борт рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта примерно на 900 м выше западного и значительно больше расчленен. В восточном борту рифта обнажаются глубинные слои океанической коры, поднятые примерно на 1 км по отношению к западному борту в результате подъема корового блока. Мощность базальтового слоя здесь не превышает 600 м. Интенсивная аномалия магнитного поля, зафиксированная над восточным бортом, очевидно, вызвана серпентинитовой протрузией, выявленной при подводных наблюдениях (Валяшко и др. 1994). Намагниченность образцов, отобранных из обнажения серпентинитов, составляет от 4 до 12 А/м. По-видимому, подъем восточного борта по отношению к западному связан с серпентинитовой протрузией.

Согласно данным гравиметрии, в гребневой части Срединно-Атлантического хребта рифтовые горы изостатически скомпенсированы на уровне земной коры, и наиболее вероятным процессом, приводящим к их воздыманию, является

серпентинизация гипербазитов, при которой их плотность уменьшается от 3,3 до 2,7 г/см<sup>3</sup>. Как показывает расчет, для того, чтобы поднять блок коры мощностью 4 км с плотностью 2,7 г/см<sup>3</sup>, на высоту 1 км, нужна серпентинизация слоя гипербазитов мощностью не менее 2 км. Можно считать поэтому, что на бортах и флангах Срединно-Атлантического хребта, судя по подъему крупных блоков коры, серпентинизация охватывает значительные области.

Особые условия для гидратации верхней мантии и серпентинизации перидотитов возникают в медленно-спрединговом Срединно-Атлантическом хребте. (Природа магнитных аномалий, 1996). Здесь гидратация верхней мантии связана с дискретным характером спрединга, когда магматическая эруптивная фаза сменяется сухой тектонической. При торможении спрединга и смене эруптивной фазы на тектоническую, происходит гидратация океанской водой гипербазитов по рифтовому ущелью в осевой части хребта, что подтверждено непосредственными наблюдениями в зоне TAG (Зоненшайн и др. 1989). При этом серпентинизации подвергаются не только породы в рифтовой зоне срединного хребта, но и в зонах пересечения его трансформными разломами. Это подтверждается результатами геологического обследования зон пересечения хребта с разломами Романш и Вима. Наряду с этим, по мере удаления блоков новообразованной коры от оси хребта, на его флангах происходит серпентинизация по первому типу с наращиванием в низах коры серпентинитового слоя.

В пределах Канаро-Багамского геотраверса для большинства участков коры, по данным магнитного моделирования по опорным разрезам, наблюдается отчетливая связь между латеральным увеличением эффективной намагниченности коры и уменьшением ее интегральной плотности (Астафурова и др. 1996). Обратная корреляция магнитных и гравитационных аномалий на флангах хребта в пределах Канаро-Багамского геотраверса позволяет предположить, что непосредственно в рифтовой долине могут формироваться узкие серпентинитовые протрузии и силлы, которые отодвигаются медленным спредингом (рис. 3).

Это приводит к формированию протяженного приразломного хребта и поднятию крупных блоков коры. Вероятно, именно гидратация верхней мантии и образование серпентинитовых массивов, контролируемые в медленно-спрединговых хребтах изменением скорости и торможением спрединга, создают билатеральные аномалии рельефа, магнитного поля и аномалий Буге на флангах Срединно-Атлантического хребта. Наличие субвертикальных серпентинитовых протрузий косвенно подтверждается обратной зависимостью между величиной эффективной намагниченности и скоростью спрединга (Астафурова и др. 1996). Можно высказать предположение, что формирование серпентинитового слоя в океанической коре вызывает латеральное изменение рельефа, которое ранее связывалось с фазовыми переходами в толще литосферы (Городницкий, 1985). Аналогичная ситуация может складываться и в других медленно-спрединговых хребтах – Срединно-Индийском и хребте Гаккеля.

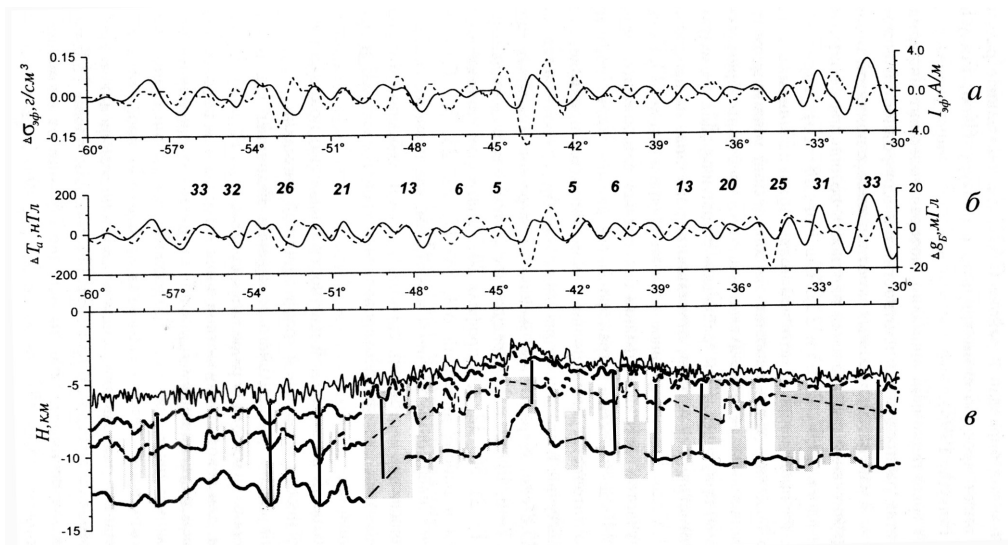


Рис. 3. Геофизический разрез через Срединно-Атлантический хребет вдоль  $28,5^\circ$  с.ш. *а* – интегральная плотность (пунктир) и эффективная намагниченность (сплошная линия); *б* – аномалия Буге (пунктир) и аномальное магнитное поле (сплошная линия); *в* – сейсмический разрез с положением границ слоев 2А, 2В, 3 по данным МОВ ОГТ (затемнение отмечены участки отсутствия отражающих границ). Цифры на рисунке – номера линейных магнитных аномалий. Вертикальными линиями нанесено вероятное положение серпентинитовых протрузий.

Что касается трансформных разломов, то в их ущельях практически повсеместно обнаружены серпентинизированные гипербазиты с высокой намагниченностью. Это относится к крупнейшим тихоокеанским разломам Мендосино, Меррей, Кларин, Хизена, Элтанин и др. (Валяшко и др. 1993). Магнитное моделирование свидетельствует о возможности существования под трогами этих разломов глубинных серпентинитовых корней (рис. 2). В ряде случаев это вызывает формирование приразломных хребтов и асимметрию в высоте бортов разломов, превышающую их расчетную разницу за счет различия возраста соприкасающихся блоков литосферы (разлом Хизена).

Анализ данных геолого-геофизического изучения основных морфоструктур океанского дна показывает, что при первом типе фронтальной билатеральной гидратации верхней мантии и наращивании двухкилометрового серпентинитового слоя в низах коры, слой этот, обладающий пластичностью и меньшей вязкостью, делает возможным субгоризонтальное перемещение по нему блоков вышележащей коры, в соответствии с механизмом двухъярусной тектоники (Лобковский, 1988). В условиях сжатия это приводит к формированию покровно-надвиговых структур и шарьяжей, создающих внутриплитовые асейсмичные поднятия. Примерами таких поднятий являются подводный хребет Горриндж в Северной Атлантике (рис. 4), и асейсмичная дислокация в Центрально-Индийской котловине (Городницкий и др., 1988, 1993).

Можно высказать предположение, что асейсмичные поднятия в С-З части Тихого океана, – возвышенность Шатского и возвышенность Хесса, также имеют

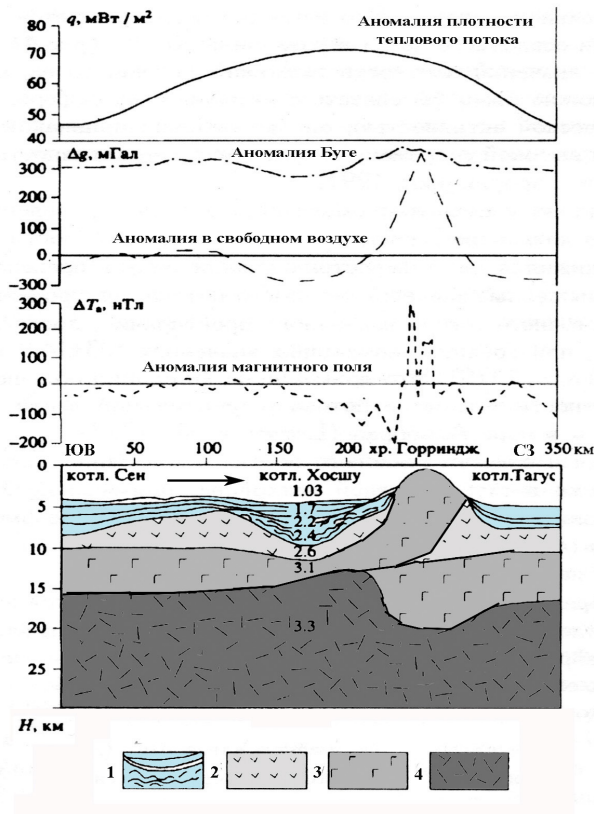


Рис. 4. Геофизический разрез через подводный хребет Горриндж и схема надвиговой структуры: 1 – осадки, 2 – габбро и базальты, 3 – серпентинизированные гипербазиты, 4 – верхняя мантия. Цифрами указаны расчётные плотности пород в г/см<sup>3</sup>. Стрелкой показано направление сжатия.

тектоническое происхождение и были сформированы в обстановке сжатия как покровно-надвиговые структуры. Косвенным подтверждением этого могут являться высокие значения плотности теплового потока обнаруженные в зоне возвышенности Шатского. При большой мощности литосферы (Городницкий, 1985) и отсутствии признаков молодого вулканизма, они могут быть вызваны только диссипативным разогревом при формировании покровно-надвиговых структур. Не исключено, что крупные океанические вулканогенные хребты, такие, как Восточно-Индийский в Индийском океане и Императорский в Тихом океане, под которыми обнаружено утолщение коры, также имеют смешанное тектоно-вулканическое происхождение и сформированы в обстановке сжатия как покровно-надвиговые структуры.

Второй тип гидратации гипербазитов верхней мантии через глубокие сквозькоровые трещины приводит к формированию массивных серпентинитовых образований, силлов и протрузий, которые создают гравитационную неустойчивость и стимулируют субвертикальные перемещения вышележащих блоков океанической коры. Это также вызывает расчленение рельефа дна, как в рифтовой долине Срединно-Атлантического хребта, так и в бортах трансформных разломов. (Магнитное поле океана, 1993).

Серпентинитовые субвертикальные протрузии могут образовывать диапиры и выходить на поверхность дна в виде локальных поднятий и серпентинитовых гор. Такие горы обнаружены на периферии Идзу-Бонинского желоба в Тихом океане (Макава et al., 2001). Серпентинитовые горы являются продолжением

серпентинитовых клиньев в верхней мантии на глубине 25–30 км. Они могут включать вулканические ксенолиты и поднимать их над окружающим океаническим дном (Stokking et al., 1992).

Третий тип гидратации гипербазитов верхней мантии связан со сложными тектоническими процессами в зонах поддвига и островодужных системах, в частности в северо-западной части Тихого океана, где океанская плита пододвигается под континентальную. На океанской периферии Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг обнаружены протяженные зоны магнитных аномалий, имеющих обратную корреляцию с аномалиями Буге (рис. 5).

Совместный анализ зон аномального магнитного поля в островодужных системах Тихого океана с результатами гравиметрических съемок, сейсмических исследований и петромагнитного изучения пород, дает возможность предположить, что эти зоны связаны 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 20–30 км в процессе поддвига (рис. 6). При достижении изотермы Хесса происходит серпентинизация с образованием магнетита (Blakely et al., 2005) и формируется магнитный «серпентинитовый пояс» (рис. 5). Термическая модель (Oleskevich et al., 1999) показывает, что во многих таких зонах температура ниже точки Кюри для магнетита – главного магнитного минерала серпентинитов.

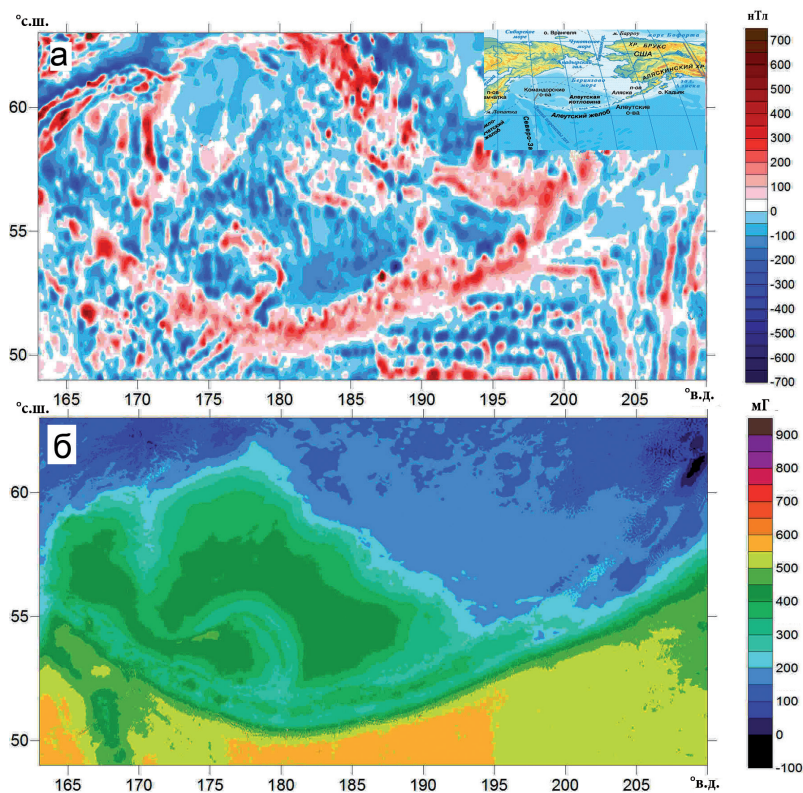


Рис. 5. Магнитный серпентинитовый пояс в зоне Алеутской дуги. Карты аномального магнитного поля (а) и аномалий силы тяжести в редукции Буге (б) [<http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012>].



Наряду с гидратацией поддвигаемой плиты океанской водой по системе трещин сверху вниз, при ее дальнейшем погружении и дегидратации происходит также гидратация выпаривающейся водой пород мантии «надвигающейся» плиты снизу вверх. В результате на подошве верхней плиты также образуется намагниченный серпентинитовый клин, который отмечается понижением поля силы тяжести и скоростей упругих волн (рис. 6). В свою очередь, поддвигаемая литосферная плита, теряя воду, становится хрупкой и ломкой, и именно здесь могут локализоваться эпицентры наиболее сильных землетрясений. (Kirbi et al., 1996).

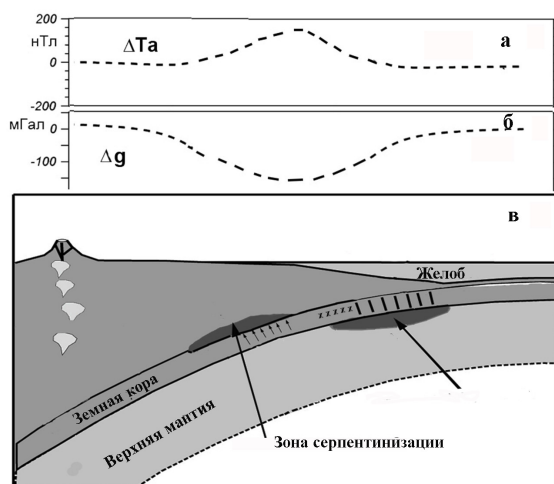


Рис. 6. Схема гидратации верхней мантии и серпентинизации в зоне субдукции. Крестиками показаны эпицентры землетрясений.

Таким образом, магнитные аномалии, выявленные в зонах поддвига, являются важным диагностическим признаком зон активной гидратации мантии сопредельной континентальной плиты восходящей водой, выпариваемой из поддвигаемой плиты. Корреляция аномалий магнитного поля с понижением аномалий Буге по данным гравиметрии является здесь важным диагностическим признаком наличия фронтов активной серпентинизации в зонах поддвига.

Присутствие серпентинитов в зоне субдукции имеет важные тектонические следствия для больших и гигантских землетрясений, в том числе цунамигенных:

1. Обезвоживание поддвигаемой плиты реактивирует разломы и приводит к землетрясениям внутри плиты (Kirbi et al., 1996). При этом в ряде случаев наблюдается пространственная связь между эпицентрами землетрясений и магнитными аномалиями.

2. В зоне поддвига самые разрушительные землетрясения вызываются первым столкновением поддвигаемой плиты с серпентинизированной мантией (Oleskevich et al., 1999). Так катастрофические цунамигенные землетрясения 2009 г. на Суматре связаны с зонами интенсивных повышенных магнитных и пониженных гравитационных аномалий. Наличие серпентинизированной мантии отмечается здесь также понижением скоростей упругих волн [Bostock et al., 2002].

3. Совместный анализ материалов магнитной съемки, измерений поля силы тяжести, термического моделирования и изучения сейсмической активности в Курило-Камчатском регионе, на Алеутской островной дуге, в Южной Америке, Япо-

нии и в Южной Аляске, показывает, что магнитная съемка может быть успешно использована для картирования гидратированной мантии и выявления потенциальных очагов разрушительных землетрясений.

Таким образом, геолого-геофизическое изучение серпентинитовых образований в основных морфоструктурах дна Мирового океана, петромагнитное изучение образцов серпентинизированных гипербазитов, магнитное и плотностное моделирование, наглядно показывают, что гидратация верхней мантии и формирование серпентинитовых массивов оказывают существенное влияние на геологическое строение и тектонику океанической коры.

Работы выполнены при поддержке РФФИ грант № 18-05-00316 и темы госбюджета № 0149-2018-0005.

### Литература

- Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Машенков 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.
- Валяшко Г.М., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Попов Э.А.* Зоны срединных хребтов и глубоководных океанических котловин // Петромагнитная модель литосферы. Киев: Наукова думка, 1994. С. 55–82.
- Гордин В.М., Городницкий А.М.* Обобщенная петромагнитная модель литосферы. Киев: Наукова думка, 1994. С. 103–107.
- Городницкий А.М., Беляев И.И., Брусиловский Ю.В., Попов К.В., Щербаков В.П.* Геомагнитные характеристики подводного хребта Горриндж (северная Атлантика) // Океанология. 1988. Т. 28. № 5. С. 814.
- Городницкий А.М., Беляев И.И., Филин А.М.* Центральная котловина Индийского океана // Магнитное поле океана. М.: Наука, 1993. С. 156–165.
- 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., Федорова Т.П.* Латеральные изменения аномалий силы тяжести в зоне САХ и процессы серпентинизации // Гравиметрические исследования Мирового океана. М.: Высшая школа. 1991. С. 15–20.
- Городницкий А.М., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Попов К.В., Шишкина Н.А., Веклич И.А.* Гидратация океанической литосферы и магнитное поле океана // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 4. С. 32–49. DOI: 10.21455/gr2017.4-3.
- Городницкий А.М., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Попов К.В., Шишкина Н.А.*

- Природа магнитных аномалий в зонах субдукции // Физика Земли. 1917. № 5. С. 1–8.
- Зоненшайн Л.П., Кузмин М.И., Лисицын А.П. и др. Тектоника рифтовой долины САХ между 26 и 24°с.ш., свидетельства вертикальных перемещений // Геотектоника. 1989. № 4. С. 99–112.
- Линькова Т.И., Кашинцев Г.Л., Городницкий А.М., Райкевич М.И. Магнитные характеристики пород в разрезе океанической коры разлома Хизена // Океанология. 1982. Т. 22. № 3. С. 446–453.
- Линькова Т.И., Райкевич М.И. Палеомагнитные исследования коренных пород западной части Тихого океана. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. 41 с.
- Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 230 с.
- Магнитное поле океана. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Назарова Е.А., Городницкий А.М. Магнитные характеристики глубинных слоев океанической коры и структура аномального магнитного поля океанов // Океанология. 1986. Т. 26. № 3. С. 446–450.
- Николаевский В.Н. Граница Мохоровича как предельная глубина хрупко-дилатансионного состояния горных пород // Докл. АН СССР. 1979. 249. № 4. С. 817–821.
- Blakely R., Brocher T., Wells R. Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle // Geology. 2005. No. 33. P. 445–448. DOI: f10.1130/G21447.
- Bostock M., Hyndman R., Rondenay S., Peacock S. An inverted continental Moho and serpentinitization of the forearc mantle // Nature. 2002. Vol. 417(6888). P. 536–538.
- Fox P.J., Opdyke N.D. Geology of the oceanic Crust: magnetic properties of the oceanic rocks // J. Geophysic. Res. 1973. Vol. 78. No. 23. P. 5139–5154.
- Kirby S., Engdahl E., Denlinger R. Intermediate-depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs, in Subduction // Top to Bottom, edited by Bebout, G.E. et al. 1996. P. 195–214.
- Levis B.T.R. Evolution of oceanic crust, seismic velocities // Earth. Planet. Sci. 1978. P. 377–404.
- 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. Vol. 76. P. 355–366.
- Oleskevich D., Hyndman R., Wang K. The up dip and down dip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia, south Alaska, SW Japan, and Chile // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104(B7). P. 14,965–14,991.
- 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. Vol. 125. P. 561–579.

## HYDRATION OF THE UPPER MANTLE AND TECTONICS OF THE OCEANIC CRUST

Gorodnitskiy A.M., Shishkina N.A.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,*

*36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [gorodnit@yandex.ru](mailto:gorodnit@yandex.ru)*

Submitted 01.11.2018, accepted 01.12.2018

The joint analysis of the results of geological and geophysical studies of the oceanic lithosphere and modern models of theoretical geodynamics allows us to distinguish three main types of hydration of the upper mantle with ocean water and their subsequent serpentinization. The first type includes frontal hydration, bilateral with respect to the axial zones of the middle ridges on their flanks along the system of microcracks, which leads to the formation of a plastic serpentinite layer with a thickness of about 2 km in the bottoms of the crust. This leads to the formation of cover-thrust structures in the compression zones. The second type is associated with the penetration of ocean water in the zones of stretching along large crust cracks into the upper mantle, where the depth of the Hess isotherm limits serpentinization. In this case, subvertical protrusions and sills are formed in the sides of the faults. The reduced density of serpentinites stimulates a subvertical rise of the overlying blocks of the cortex. The third type is the complex process of the formation of serpentinites in the subduction zones in the moving plate during the hydration with ocean water from above and in the coming plate as a result of dehydration from the bottom. At the same time, the dehydration of the moving ocean plate makes it fragile and can stimulate strong earthquakes. Serpentine formations have a high magnetization and make a significant contribution to the anomalous magnetic field in oceanic areas.

**Keywords:** Tectonics, upper mantle, oceanic crust, hyperbasites, serpentinization, middle ridges, transform faults, magnetic field, gravity field, heat flux, magnetic modeling, subduction zones, isostasia

### References

- Astafurova E.G., Gorodnitskiy A.M., Lukianov S.V., and Mashchenkov S.P.* Priroda magnitnykh anomalii i stroyeniye okeanicheskoy kory Sredinno-Atlanticheskogo khrebta i prilgayushchikh kotlovin v predelakh Kanaro-Bagamskogo geotraversa. (The nature of magnetic anomalies and the structure of the oceanic crust of the Mid-Atlantic Ridge and adjacent basins within the Canar-Bahamas geotraverse), Priroda magnitnykh anomalii i stroyeniye okeanicheskoy kory. Moskva: Izd-vo VNIRO, 1996, pp. 171–202.
- Bostock M., Hyndman R., Rondenay S., and Peacock S.* An inverted continental Moho and serpentinization of the forearc mantle. *Nature*, 2002, Vol. 417(6888), pp. 536–538.
- Fox P.J. and Opdykte N.D.* Geology of the oceanic Crust: magnetic properties of the oceanic rocks. *J. Geophysic. Res.*, 1973, Vol. 78, No. 23, pp. 5139–5154.
- Gordin V.M. and Gorodnitskiy A.M.* Obobshchennaya petromagnitnaya model litosfery (Generalized petromagnetic model of the lithosphere). Kiyev: Naukova dumka, 1994, pp. 103–107.
- Gorodnitskiy A.M.* Stroyeniye okeanskoy litosfery i formirovaniye podvodnykh gor (The structure of the oceanic lithosphere and the formation of seamounts). Moskva: Nauka, 1985, 166 p.

- Gorodnitskiy A.M., Belyayev I.I., Brusilovskiy Yu.V., Popov K.V., and Shcherbakov V.P.* Geomagnitnyye kharakteristiki podvodnogo khrebta Gorrindzh (severnaya Atlantika). (Geomagnetic characteristics of the submarine ridge Gorringe (North Atlantic)). *Okeanologiya*, 1988, Vol. 28, No. 5, pp. 814.
- Gorodnitskiy A.M., Belyayev I.I., and Filin A.M.* Tsentralnaya kotlovina Indiysskogo okeana, Magnitnoye pole okeana. (Central Indian Ocean Basin, Ocean Magnetic Field), Moscow: Nauka, 1993, pp. 156–165.
- Gorodnitskiy A.M. and Brusilovskiy Yu.V.* Priroda magnitnykh anomalii i stroyeniye okeanicheskoy kory v zonakh aseismichnykh khrebtov i vnutriplitovykh dislokatsiy. (The nature of magnetic anomalies and the structure of the oceanic crust in the zones of aseismic ridges and intraplate dislocations), *Priroda magnitnykh anomalii i stroyeniye okeanicheskoy kory*. Moskva: Izd-vo VNIRO, 1996, pp. 203–242.
- Gorodnitskiy A.M., Brusilovskiy Yu.V., Ivanenko A.N., Popov K.V., Shishkina N.A., and Veklich I.A.* Gidratatsiya okeanicheskoy litosfery i magnitnoye pole okeana, Geofizicheskiye issledovaniya. (Hydration of the oceanic lithosphere and ocean magnetic field, Geophysical surveys), 2017, Vol. 18, No. 4, pp. 32–49, doi: 10.21455/gr2017.4-3.
- Gorodnitskiy A.M., Brusilovskiy Yu.V., Ivanenko A.N., Popov K.V., and Shishkina N.A.* Priroda magnitnykh anomalii v zonakh subduksii. (The nature of magnetic anomalies in subduction zones). *Fizika Zemli*, 1917, No. 5, pp. 1–8.
- Gorodnitskiy A.M. and Fedorova T.P.* Lateralnyye izmeneniya anomalii sily tyazhesti v zone SAKh i protsessy serpentinizatsii. (Lateral changes in gravity anomalies in the Sah zone and serpentinization processes), *Gravimetricheskiye issledovaniya Mirovogo okeana*. Moscow: Vysshaya shkola, 1991, pp. 15–20.
- Gorodnitskiy A.M. and Shishkina N.A.* Obobshchennaya petromagnitnaya model okeanskoj litosfery (Generalized petromagnetic model of the oceanic lithosphere). *Priroda magnitnykh anomalii i stroyeniye okeanicheskoy kory*. Moskva: Izd-vo VNIRO, 1996, pp. 243–252.
- Kirby S., Engdahl E., and Denlinger R.* Intermediate-depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs, in *Subduction. Top to Bottom*, edited by Bebout G.E. et al., 1996, pp. 195–214.
- Levis B.T.R.* Evolution of oceanic crust. seismic velocities, *Earth. Planet. Sci.*, 1978, pp. 377–404.
- Linkova T.I., Kashintsev G.L., Gorodnitskiy A.M., and Raykevich M.I.* Magnitnyye kharakteristiki porod v razreze okeanicheskoy kory razloma Khizena. *Okeanologiya*, 1982, Vol. 22, No. 3, pp. 446–453.
- Linkova T.I. and Raykevich M.I.* Paleomagnitnyye issledovaniya korennykh porod zapadnoy chasti Tikhogo okeana. Magadan: SVKNII DVO AN SSSR, 1989, 41 p.
- Lobkovskiy L.I.* Geodinamika zon spredinga. subduksii i dvukhyarusnaya tektonika plit. Moskva: Nauka, 1988, 230 p.
- Maekawa H., Yamanoto K., Teruaki I., Ueno T., and Osada Y.* Serpentine 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.
- Magnitnoye pole okeana. Moskva: Nauka, 1993, 298 p.
- Nazarova E.A. and Gorodnitskiy A.M.* Magnitnyye kharakteristiki glubinykh slojev okeanicheskoy kory i struktura anomalnogo magnitnogo polya okeanov. *Okeanologiya*, 1986, Vol. 26, No. 3, pp. 446–450.
- Nikolayevskiy V.N.* Granitsa Mokhorovichicha kak predelnaya glubina khрупko-dilatatsionnogo sostoyaniya gornykh porod. *Dokl. AN SSSR*, 1979, Vol. 249, No. 4, pp. 817–821.

- Oleskevich D., Hyndman R., and Wang K.* The up dip and down dip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia. south Alaska. SW Japan. and Chile. *J. Geophys. Res.*, 1999, Vol. 104(B7), pp. 14.965–14.991.
- 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.
- Valyashko G.M., Gorodnitskiy A.M., Lukianov S.V., and Popov E.A.* Zony sredinnykh khrebtov i glubokovodnykh okeanicheskikh kotlovin, Petromagnitnaya model litosfery. Kiyev: Naukova dumka, 1994, pp. 55–82.
- Vlakely 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.
- Zonenshayn L.P., Kuzmin M.I., and Lisitsyn A.P.* Tektonika riftovoy doliny SAKh mezhdru 26 i 24°s.sh., svidetelstva vertikalnykh peremeshcheniy. *Geotektonika*, 1989, No. 4, pp. 99–112.