

# ИСТОРИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Ю.И. Блох<sup>1</sup>, В.И. Бондаренко<sup>2</sup>, В.А. Рашидов<sup>3</sup>, А.А. Трусов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Москва, yuri\_blokh@mail.ru

<sup>2</sup>Костромской Государственный Университет им. Н.А. Некрасова, vbond@list.ru

<sup>3</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, rashidva@kscnet.ru

<sup>4</sup>ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика», trusov@aerogeo.ru

Одним из регионов, планомерно и детально изучающимся отечественными учеными, является Курильская островная дуга (КОД), на Охотоморском склоне которой располагается большое количество подводных вулканов. Первые сведения о 47 подводных вулканах Курильской островной дуги получены 1949-55 гг. в экспедициях Института океанологии АН СССР на НИС «Витязь» и «Крылатка» [Безруков и др., 1958]. Сведения о геомагнитных исследованиях подводных вулканов КОД, выполненных до 1981 г., крайне малочисленны. В 1957-59 гг. в рамках Международного Геофизического Года сотрудниками ВНИИГеофизика была проведена рекогносцировочная аэромагнитная съемка Охотского моря и Большой Курильской гряды [Соловьев, 1970; Соловьев, Гайнанов, 1963]. В работе [Гайнанов и др., 1968] есть указание на то, что локальные положительные аномалии  $\Delta T_a$ , наблюдаемые к северо-западу от Большой Курильской Гряды, приурочены к подводным горам вулканического происхождения. В работе [Yasyi et al., 1967] приведены результаты магнитной съемки двух, а в работе [Воробьев, 1977] – четырех подводных гор (вулканов).

Планомерное изучение подводного вулканизма КОД было выполнено в 11-ти комплексных вулканологических экспедициях в рейсах НИС «Вулканолог» в 1981-91 гг. Институтом вулканологии ДВО РАН и Институтом вулканической геологии и геохимии ДВО РАН [Авдейко и др., 2005; Подводный..., 1992]. В этих экспедициях получен большой фактический материал и изучены 109 подводных вулканов и гор КОД [Рашидов, 2009]. Для большей части Курильской островной дуги и прилегающих участков Охотского моря были выполнены эхолотный промер, непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) и модульная гидромагнитная съемка (ГМС) по системе пересекающихся галсов со средним межпрофильным расстоянием 5 км и со сгущением на отдельных участках до 0.5-1 км. Навигационная привязка геофизических профилей осуществлялась с помощью судовых радиолокаторов «Океан-21» и «Океан-23» по береговым ориентирам или сигнальному бую. Общий объем отработанных профилей около 60000 погонных км. К большому сожалению, часть геофизических исследований была выполнена по редкой неравномерной сети наблюдений.

В первых рейсах НИС «Вулканолог» в 1977-81 гг. ГМС проводилась квантовым магнитометром КМ-2, а начиная с 1982 г. - протонным магнитометром ПМИВ. В наблюдаемые значения магнитного поля вводилась поправка за девиацию. Определение девиации при прохождении судна в спокойном магнитном поле через фиксированную точку на 8-ми румбах. Курсовая девиация во время проведения вулканологических исследований не превышала 10-12 нТл. Косвенный учет вариаций осуществлялся путем проведения контрольных замеров на прямом и обратном курсах, а также путем анализа невязок в точках пересечения опорных и секущих маршрутов. Среднеквадратическая погрешность во время проведения ГМС на полигонах не превышала 7-10 нТл. В аномальных зонах величина среднеквадратической погрешности достигала 18-22 нТл. Измерение естественной остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости драгированных образцов осуществлялось в лабораторных условиях астатическим магнитометром МА-21 и каппаметром КТ-3.

Проведенные исследования показали, что большинство подводных вулканов КОД четко отражается в магнитном поле, и к ним приурочены локальные аномалии  $\Delta T_a$ , не нарушающие общий характер поля. Аномалии имеют различные простирания, а размеры их сопоставимы с размерами оснований вулканических построек. Преобладают изометричные аномалии, хотя в ряде случаев отмечены и вытянутые формы. Основанию вулкана могут соответствовать как положительные, так и отрицательные значения магнитного поля. Над вершинами вулканических

построек наблюдается повышение магнитного поля и, в основном, положительные значения поля. Над некоторыми вулканами отмечен мозаичный характер аномального магнитного поля. Интенсивность аномалий  $\Delta T_a$ , наблюдаемых на акватории над подводными вулканами КОД, изменяется от 70 до 1000 нТл. Выявлено большое количество высокоградиентных зон. Горизонтальный градиент поля нередко превышает 100 нТл/км. Большая часть вулканических построек намагничена по направлению современного магнитного поля.

К огромному сожалению, в последние годы изучению подводного вулканизма КОД в нашей стране не уделяется должного внимания. В связи с этим большое значение приобретают материалы, полученные в этом регионе в предыдущие годы при проведении морских комплексных геофизических исследований.

Для интерпретации данных, полученных на редких неравномерных сетях наблюдений, разработана технология количественной интерпретации материалов морских геомагнитных исследований в комплексе с эхолотным промером, НСП и драгированием, позволяющая проводить интерпретацию непосредственно по исходным данным, не прибегая к некорректной процедуре их предварительного редуцирования в регулярную сеть. Технология состоит в применении методов особых точек [Блох, 2009; Блох и др., 1993] и 2.5D моделирования [Лойтер и др., 1986] на отдельных галсах, и последующего 3D моделирования с мощью программ пакета структурной интерпретации СИГМА-3D [Бабаянц и др., 2004] по всему массиву исходных данных на базе модели субгоризонтального слоя с латерально изменяющейся намагниченностью. При расчетах всегда используется истинный рельеф вулканических построек с учетом погребенного под осадками основания, полученный по данным эхолотного промера и НСП.

Разработанная технология была успешно внедрена при изучении подводных вулканов КОД. Результаты анализа особых точек функций, описывающих аномальные поля, оказались достаточно интересными, особенно, для неглубоко расположенных вулканов, где особенности отмечаются не только на верхней кромке магнитных пород, но зачастую и в магматических камерах [Блох и др., 2010]. В ряде случаев с помощью анализа расположения особых точек можно установить направление каналов, подводящих магму. Следует отметить, что двумерный (а не 3D) анализ все же обладает рядом недостатков, в частности, неотъемлемо присущими ему тенденциями проектировать особенности от объектов, залегающих сбоку, на интерпретируемый профиль. Благодаря этой неприятной особенности 2D интерпретации, ряд локализуемых особенностей оказывается в толще воды, но нанесенная линия дна позволяет в данном случае легко выявлять и отсекают эти боковые влияния [Блох и др., 2010]. 2.5D моделирование позволило выделить в пределах вулканических построек вершинные кальдеры и различные блоки [Рашидов, Бондаренко, 2003, 2004]. Для ряда подводных вулканов КОД была выполнена интерпретация аномального магнитного поля с помощью программ пакета структурной интерпретации СИГМА-3D [Бабаянц и др., 2005; Блох и др., 2006а, 2006б, 2008а, 2008б], который в настоящее время является наиболее эффективным средством автоматизированного трехмерного моделирования гравитационных и магнитных аномалий.

Среди направлений применения пакета СИГМА-3D одним из наиболее перспективных представляется интерпретация данных морской магниторазведки, в первую очередь, моделирование подводных вулканов [Бабаянц и др., 2005]. 3D-технологии, реализованные в пакете, предоставляют интерпретаторам большие возможности, причем условия, возникающие при изучении подводных вулканов, могут считаться для них в каком-то смысле наиболее благоприятными. В первую очередь это относится к технологии, реализованной в программе REIST [Бабаянц и др., 2004]. Она предназначена для построения модели субгоризонтального слоя с латерально изменяющимися намагниченностью и плотностью. При изучении подводных вулканов проблема задания рельефа верхней кромки трехмерной модели решается максимально эффективно по данным сейсмоакустических исследований и эхолотного промера, что и делает получаемую модель фактически адекватной, а не эквивалентной или смешанной, как обычно происходит при изучении аномалий на континентах. Построенная таким образом субгоризонтальная модель аппроксимируется совокупностью квадратных в плане однородных многогранников, расположенных в один слой. Элементарные многогранники располагаются не только в областях съемки, но и на месте лакун, а также на обрамлении исследуемого участка для учета краевых эффектов. Их размер в плане выбирается, исходя из средней глубины залегания

верхней границы модели, и примерно равен ей. Если глубины залегания слоя достаточно велики, элементарный многогранник считается вертикальной призмой (6-гранником) с горизонтальными верхней и нижней кромками. Для неглубокозалегających объектов подобная аппроксимация чересчур груба, и 6-гранник заменяется на 7-гранник. При этом верхняя кромка, оставаясь квадратной в плане, разбивается на две наклонные треугольные грани, что дает возможность автоматической и достаточно точной аппроксимации морфологически сложных подводных вулканов. Затем программа REIST определяет по наблюдаемому полю с помощью спектрально эквивалентного релаксационного метода разность между плотностью или намагниченностью каждого из элементарных многогранников по отношению к одному из них, принимаемому в качестве базового.

При моделировании магнитных аномалий требуется также задать направление вектора намагниченности пород, которое обычно принимается совпадающим с направлением главного геомагнитного поля в изучаемом регионе, то есть намагниченность пород предполагается преимущественно индуктивной и направленной коллинеарно современному полю. В программе REIST для этого заложена возможность вычисления компонент нормального геомагнитного поля по модели IGRF. В то же время, если направление вектора намагниченности сильно отклонено от направления современного поля, это также может быть идентифицировано по расчетам с данной программой. Уточнение основного направления вектора намагниченности пород вулканической постройки осуществляется с помощью программы ИГЛА. При заданных условиях избыточные (эффективные) намагниченности каждого из элементарных многогранников определяются по внешним полям однозначно, что было теоретически доказано В.М. Новоселицким [1965]. Исходные поля при этом задаются в реальных точках наблюдений, то есть по неравномерной сети с учетом альтитуд.

Результаты моделирования в программе REIST представляют собой эффективные намагниченности, то есть разности между истинными значениями физических свойств в каждом из элементов и соответствующими значениями в базовом элементе, выбираемом программой автоматически или по указанию интерпретатора. Этот процесс полностью устраняет влияние на результаты постоянного регионального фона, который содержится в интерпретируемых полях. При этом реализуется решение нелинейной обратной задачи, что выгодно отличает разработанную технологию от ряда существующих технологий, в которых применяется то или иное линейное, чаще гармоническое, приближение для аномалий  $\Delta T$ . Следует отметить достаточно хорошее совпадение результатов 2.5D и 3D моделирования, но в трехмерном случае модель становится более дифференцированной и отражающей тонкие детали строения вулкана [Бабаянц и др., 2005].

Применение разработанной технологии количественной интерпретации материалов морских геомагнитных исследований позволило выявить в пределах подводных вулканических построек вершинные кальдеры, побочные лавовые конусы и экструзивные купола; определить местоположение активных вулканических центров и магматических камер; выделить отдельные лавовые потоки и направление подводящих каналов. В непосредственной близости от вулканов были отмечены линейные зоны, сложенные породами с повышенной намагниченностью. Отмечено хорошее совпадение результатов вычисления эффективной намагниченности с данными лабораторного изучения физических свойств драгированных образцов, что позволило идентифицировать выделенные лавовые потоки по составу слагающих их пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (проект 09-III-A-08-427).

### **Список литературы**

**Авдейко Г.П., Бондаренко В.И., Палуева А.А.** и др. Геофизические исследования подводных вулканов Курильской островной дуги: состояние, итоги, перспективы // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. 30 марта-1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2005. 3-7.

**Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Бондаренко В.И.** и др. Применение пакета программ структурной интерпретации СИГМА-3D при изучении подводных вулканов Курильской островной дуги // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2005. № 2. Вып. 6. 67-76.

- Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.** Возможности структурно-вещественного картирования по данным магниторазведки и гравиразведки в пакете программ СИГМА-3D // Геофизический вестник. 2004. № 3 С. 11-15.
- Безруков П.Л., Зенкевич Н.Л., Канаев В.Ф., Удинцев Г.Б.** Подводные горы и вулканы Курильской островной гряды // Труды Лаб. вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 71-88.
- Блох Ю.И.** Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие. М., 2009. <http://sigma3d.com/content/view/24/2/>.
- Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н.** Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе «СИНГУЛЯР» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123-127.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.** Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 5. 17-26.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.** Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный. 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. чл-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006б. С. 135-143.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.** Геофизическое изучение подводных вулканов Курильской островной дуги // Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов // Материалы Международной конференции, посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН, 4-8 февраля 2008 г. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2008а. С. 19-22.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.** Подводный вулкан Берга [Курильская островная дуга] // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008б. № 2. Вып. 12. С. 70-75.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.** Применение интегрированной системы «СИНГУЛЯР» для изучения глубинного строения подводных вулканов Курильской островной дуги // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва, 25 - 29 января 2010 г. М.: ИФЗ РАН. 2010. С. 62-65.
- Воробьев В.М.** Магнитное поле как индикатор вещественного состава намагниченных пород (на примере подводных гор юго-востока Охотского моря) // Естественные геофизические поля дальневосточных окраинных морей. Владивосток. 1977. С. 57-63.
- Гайнанов А.Г., Исаев С.И., Удинцев Г.Б.** Магнитные аномалии и морфология дна островных дуг северо-западной части Тихого океана // Океанология. 1968. Т. 8. Вып. 6. С. 1017-1024.
- Лойтер П.П., Карсаков Л.П., Малышев Ю.Ф.** Связь магматогенных рудоконтролирующих структур с глубинным строением Западного Приохотья // Тихоокеанская геология. 1986. № 6. С. 82-94.
- Новоселицкий В.М.** К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести // Известия АН СССР. Физика Земли. 1965. № 5. С. 25-32.
- Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги** / Ответственный редактор академик Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.
- Рашидов В.А.** История изучения подводных вулканов Курильской островной дуги // Материалы Всероссийской научной конференции «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908-1910 гг.». Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2009а. С. 199-210.
- Рашидов В.А., Бондаренко В.И.** Подводный вулканический массив Эдельштейна (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 3-13.
- Рашидов В.А., Бондаренко В.И.** Геофизические исследования подводного вулкана Крылатка (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 65-76.
- Соловьев О.Н.** О геологической природе магнитных аномалий // Обзор. МГ. СССР. М.: ВИЭМС, 1970. 55 с.
- Соловьев О.Н., Гайнанов А.Г.** Особенности глубинного геологического строения переходной зоны от Азиатского материка к Тихому океану в районе Курило-Камчатской островной дуги // Советская геология. 1963. № 3. С. 113-123.
- Yasui M., Hashimoto Y., Ueda S.** Geomagnetic and Bathymetric Study of the Okhotsk Sea - [1] // Oceanographical Magazine. 1967. V. 19. № 1. P. 75-85.