

УДК 550.83:551.214(265)

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ СТРУКТУРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СИГМА-3D ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

©2005 П. С. Бабаянц¹, Ю. И. Блох², В. И. Бондаренко³, В. А. Рашидов⁴, А. А. Трусов¹

¹ ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика», 107140, Москва, Н. Красносельская, 4; e-mail: bab@aerogeophysica.com

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Орджоникидзе, 117873, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23; e-mail: yuri_blokh@mail.ru

³ Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова, 156000, Кострома, ул. 1 Мая, 1; e-mail: vbond@list.tu

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9; e-mail: rashidva@kcs.iks.ru

Эффективным средством автоматизированного трехмерного моделирования при изучении магнитных аномалий, созданных подводными вулканами, является пакет программ структурной интерпретации СИГМА-3D. С помощью этого пакета программ изучены подводные вулканы Григорьева, Крылатка и Юбилейный, расположенные в пределах Курильской островной дуги.

В настоящее время наиболее эффективным средством автоматизированного трехмерного моделирования гравитационных и магнитных аномалий является пакет программ структурной интерпретации СИГМА-3D (Бабаянц и др., 2003а; 2003б; 2003в; 2004). Этот пакет программ применяется при решении разнообразных геологических задач в регионах, находящихся как в экваториальной зоне, так и в северном и южном полушариях Земли. Пакет показал устойчивую работоспособность в условиях любых наклонов главного геомагнитного поля. Только в Российской Федерации с его помощью проведена интерпретация потенциальных полей примерно на четверти ее территории.

Среди направлений применения пакета СИГМА-3D одним из наиболее перспективных представляется интерпретация данных морской магниторазведки, в первую очередь, моделирование подводных вулканов. Для решения этой задачи до сих пор, как правило, применяются программы, реализующие различные 2D и 2.5D технологии и не дающие возможности получения достаточно полного представления о пространственной структуре сложных объектов.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

3D-технологии, реализованные в пакете, предоставляют интерпретаторам несравненно 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. Она предназначена для построения модели субгоризонтального слоя с латерально изменяющимися намагниченностью и плотностью. При решении геологических задач на континентах верхняя кромка слоя обычно задается по данным бурения, сейсморазведки, электромагнитных зондирований, а также с привлечением информации, получаемой с помощью программы ROMGAS из того же пакета СИГМА-3D. Нижняя кромка слоя чаще принимается горизонтальной, а ее альтитуда оценивается по спектру интерпретируемого поля, хотя и нижняя граница может задаваться на основе априорных сведений.

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 (International Geomagnetic Reference Field). В то же время, если направление вектора намагниченности сильно отклонено от направления современного поля, это также может быть учтено программой. При заданных условиях избыточные (эффективные) плотности и намагниченности каждого из элементарных многогранников определяются по внешним полям однозначно, что было теоретически доказано В.М. Новоселицким (1965).

Подчеркнем, что исходные поля при этом задаются в реальных точках наблюдений, то есть по неравномерной сети с учетом альтитуд. Для комплексных съемок, проводимых на разных уровнях, например, одновременных съемок с помощью аэромагнитометров, буксируемых по

поверхности моря и заглубленных датчиков, в интерпретацию могут одновременно вовлекаться все данные, в том числе измеренные друг над другом. Как правило, число точек магнитной съемки со значениями исходного поля значительно больше числа элементарных призм. Часть из них относится программой к активным или ведущим, и именно по ним корректируется модель в процессе последовательных приближений. Другая, обычно большая, часть точек наблюдений считается пассивной. В них вычисляется поле подбираемой модели, они участвуют в оценке погрешности подбора на каждой итерации, но никак не влияют на формирование следующего приближения. Наличие пассивных точек ведет к тому, что итерационный процесс приходится останавливать, когда программа перестает уменьшать среднеквадратическую погрешность подбора. Получаемая величина стандарта фактически характеризует ту часть поля, которая не может быть объяснена в рамках используемой модели, и она сама по себе может являться предметом анализа.

Результаты моделирования в программе REIST представляют собой эффективные плотности и 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. Особо подчеркнем, что применительно к данным гравиразведки описанный итерационный процесс реализует решение линейной обратной задачи, в то время как для магнитных аномалий ΔT при этом реализуется решение нелинейной обратной задачи. Последнее выгодно отличает разработанную технологию от ряда существующих, где применяется то или иное линейное, чаще гармоническое, приближение для аномалий ΔT .

Если имеются данные комплексных гравиметрических и магнитометрических съемок, с помощью программы REIST независимо строятся две петрофизические модели, характеризующие эффективные плотности и намагниченности. В этом случае с помощью программы CLASS2, входящей в пакет СИГМА-3D, можно осуществить структурно-вещественное картирование изучаемого вулкана (Бабаянц и др., 2004). Данная программа предназначена для интерактивной двухпараметровой классификации, и с ее помощью можно разделять распределения любой пары параметров, заданных на произвольных площадях, на непесекающиеся, статистически однородные классы с одновременным построением карты выделяемых классов. Применение программы CLASS2

оказалось весьма эффективным, в частности, при изучении кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы, погребенного под мощным осадочным чехлом (Бабаянц и др., 2003а).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Технологии, реализованные в пакете СИГМА-3D, были опробованы при изучении подводных вулканов Григорьева, Крылатка и Юбилейный, расположенных в пределах Курильской островной дуги (рис. 1).

Эти вулканы были изучены в 1981-1989 гг. во время проведения комплексных вулканологических экспедиций с борта НИС «Вулканолог» (Надежный, 1988; Подводный..., 1992; Рашидов, 2001; Рашидов, Бондаренко, 2004). Комплекс исследований включал эхолотный промер, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, гидромагнитную съемку, драгирование и отбор проб донных осадков.

Плосковершинный подводный вулкан Григорьева (1.1 по (Подводный..., 1992)) находится в 5.5 км к северо-западу от о. Атласова (вулкан Алаид) и в 58 км от вулканического фронта. Он назван в честь выдающегося отечественного геолога И.Ф. Гри-

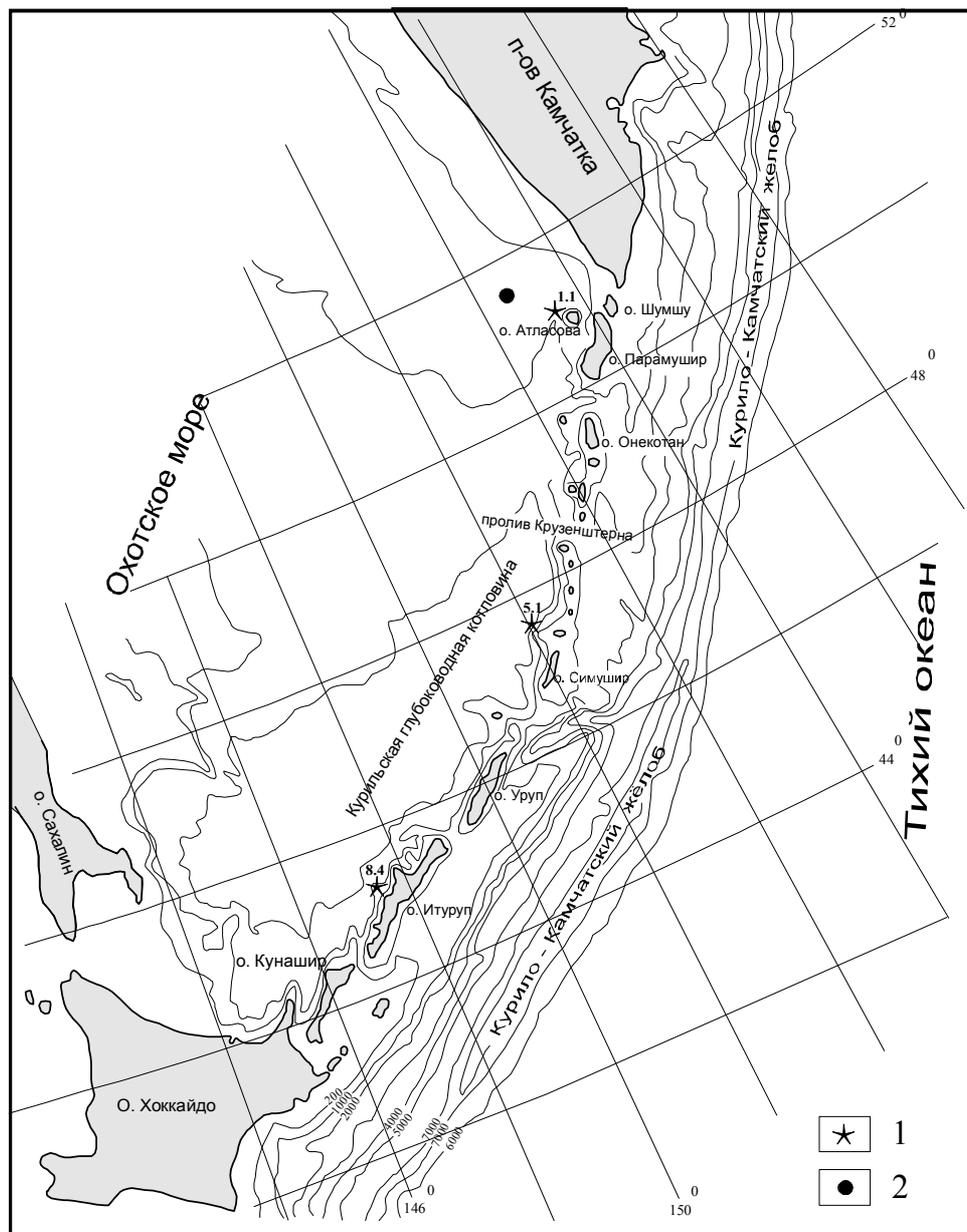


Рис. 1. Местоположение подводных вулканов Григорьева, Крылатка и Юбилейный: 1 – подводные вулканы. 2 – банка Лебеда. Цифрами, согласно (Подводный..., 1992), обозначены: 1.1 – подводный вулкан Григорьева; 5.1 – подводный вулкан Юбилейный; 8.4 – подводный Крылатка.

горьева (Безруков и др., 1958). Вулкан поднимается с глубин 800-850 м, и его основание срослось с основанием вулкана Алаид.

Подводный вулкан Григорьева располагается на генеральной линии северо-западного направления местоположения побочных кратеров вулкана Алаид (Абдурахманов и др., 1978; Геолого-геофизический..., 1987; Подводный..., 1992; Федорченко и др., 1989). На этой же линии, на расстоянии ~ 85 км от вулкана Григорьева, находится банка Лебеда.

Размеры подводного вулкана Григорьева по основанию составляют 12.5x15 км, а по изобате 500 м - 8.5x11.5 км (рис. 2а). Объем вулканической постройки около 40 км³. Крутизна склонов достигает 10°-15° (Подводный..., 1992; Рашидов, 2001).

Вершина подводного вулкана Григорьева срезана абразией и нивелирована до уровня 120-140 м, что практически соответствует уровню моря в позднем плейстоцене. В юго-западной части вершины отмечены скальные выступы, поднимающиеся до глубины 50-55 м. В некоторых работах (Безруков и др., 1958; Подводный..., 1992; Рашидов, 2001) высказывалось предположение, что эти скальные выступы представляют собой отпрепарированный некк. Возможно, они образовались после формирования вершины и представляют собою голоценовые экструзии или небольшие лавовые постройки.

У основания северной части вулканической постройки отмечены отдельные экструзивные купола или лавовые конусы (Авдейко и др., 1984), самый крупный из которых, расположенный на глубине 350 м на расстоянии ~ 5 км от плоской вершины на восточном склоне вулкана, имеет размер основания в поперечнике – 1.4 км и относительную высоту 100 м.

На юго-западном склоне вулкана отмечена цепочка скальных выступов северо-восточного простирания с относительной высотой от 30 до 60 и размерами в поперечнике – 400-650 м, которые, скорее всего, также являются экструзивными куполами или лавовыми конусами. Наличие значительного количества побочных лавовых конусов является характерным отличием подводного вулкана Григорьева и генетически связанного с ним действующего острова-вулкана Алаид от остальных массивов и одиночных вулканов Курильской островной дуги.

При драгировании подводного вулкана Григорьева были подняты однотипные высокоглиноземистые, высокожелезистые, высококалиевые и умеренно-титанистые базальты (Абдурахманов и др., 1978; Подводный..., 1992; Рашидов, 2001).

Остаточная намагниченность драгированных базальтов изменяется в диапазоне 1.47-28.45 А/м, магнитная восприимчивость – в диапазоне (2.39-

94.83)x10⁻³СИ, а отношение Кенигсбергера – в диапазоне 1.24-22.65.

Судя по записям непрерывного сейсмоакустического профилирования, вулканическая постройка сложена, в основном, плотными вулканическими породами. Мощность осадочного чехла в окрестностях вулкана Григорьева достигает 1.5–2 км.

К подводному вулкану Григорьева приурочена интенсивная аномалия магнитного поля ΔT_a с размахом более 1400 нТл (рис. 2б). Вулканическая постройка намагничена по направлению современного магнитного поля. Магнитное поле имеет мозаичный характер. Все выделенные по данным эхолотного промера и непрерывного сейсмического профилирования скальные выступы в юго-западной части плоской вершины и на юго-западном склоне вулкана отчетливо проявляются в магнитном поле наличием локальных аномалий. Расчеты, выполненные с помощью пакета программ структурной интерпретации СИГМА-3D, показали, что эффективная намагниченность этих выступов сопоставима с эффективной намагниченностью самой постройки подводного вулкана Григорьева (рис. 2в, 2г). Это, вероятнее всего, указывает на их лавовую природу, и отмеченные неоднородности рельефа действительно являются экструзивными куполами или лавовыми конусами, развитыми вдоль радиальной трещины северо-восточного простирания. Среднеквадратическая погрешность аппроксимации аномального поля составила 58 нТл.

Сравнивая значения эффективной намагниченности и результаты изучения магнитных свойств драгированных пород, можно предположить, с большой долей вероятности, что вся постройка подводного вулкана Григорьева сложена однотипными высокоглиноземистыми базальтами.

Плосковершинный подводный вулкан Крылатка (8.4 по (Подводный..., 1992)) назван в честь исследовавшего его в 1955 г. экспедиционного судна (Безруков и др., 1958). Он представляет собой конусовидную постройку субмеридионального простирания, с плоской вершиной на глубине 300 м. Размер плоской вершины – 4.3x6.5 км, и она слегка вытянута в субмеридиональном направлении (рис. 3а). В южной части вершины на глубинах 180-220 м отмечен пик северо-восточного простирания размером 4.3x3.3 км. Северные и западные склоны вулкана опускаются до глубин 2200-2300 м. От о.Итуруп постройка отделена глубинами около 900 м. Крутизна склонов увеличивается от 15° в нижней части до 20-25° градусов у вершины. Угол наклона плоской вершины равен 1.5°-2° (Подводный..., 1992; Рашидов, Бондаренко, 2004).

Судя по характеру сейсмоакустического изображения, постройка вулкана Крылатка сложена,

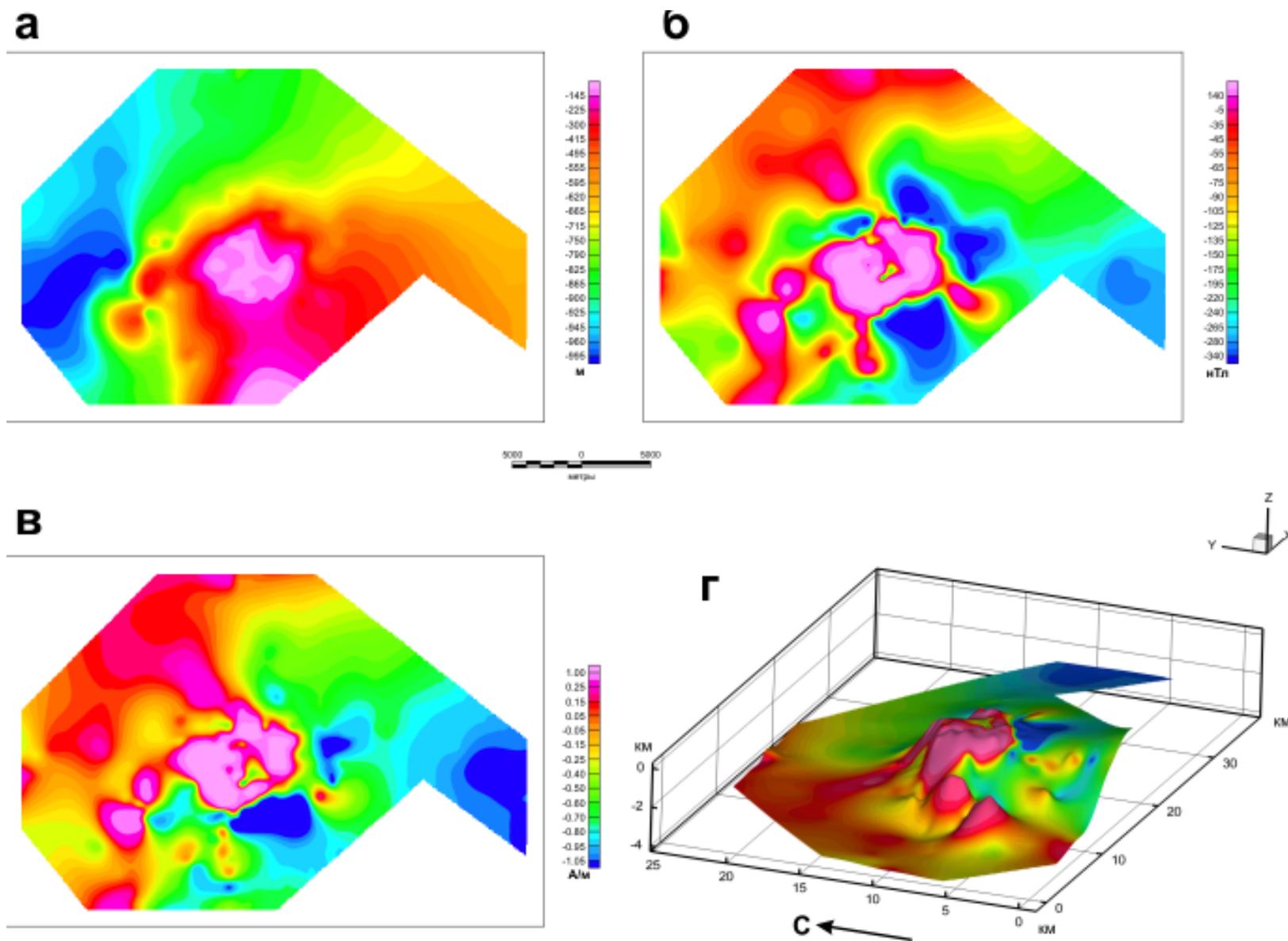


Рис. 2. Подводный вулкан Григорьева: *a* – батиметрия; *б* – аномальное магнитное поле ΔT_a ; *в* – распределение эффективной намагниченности вулкана; *г* – распределение эффективной намагниченности, изображенное на поверхности вулкана.

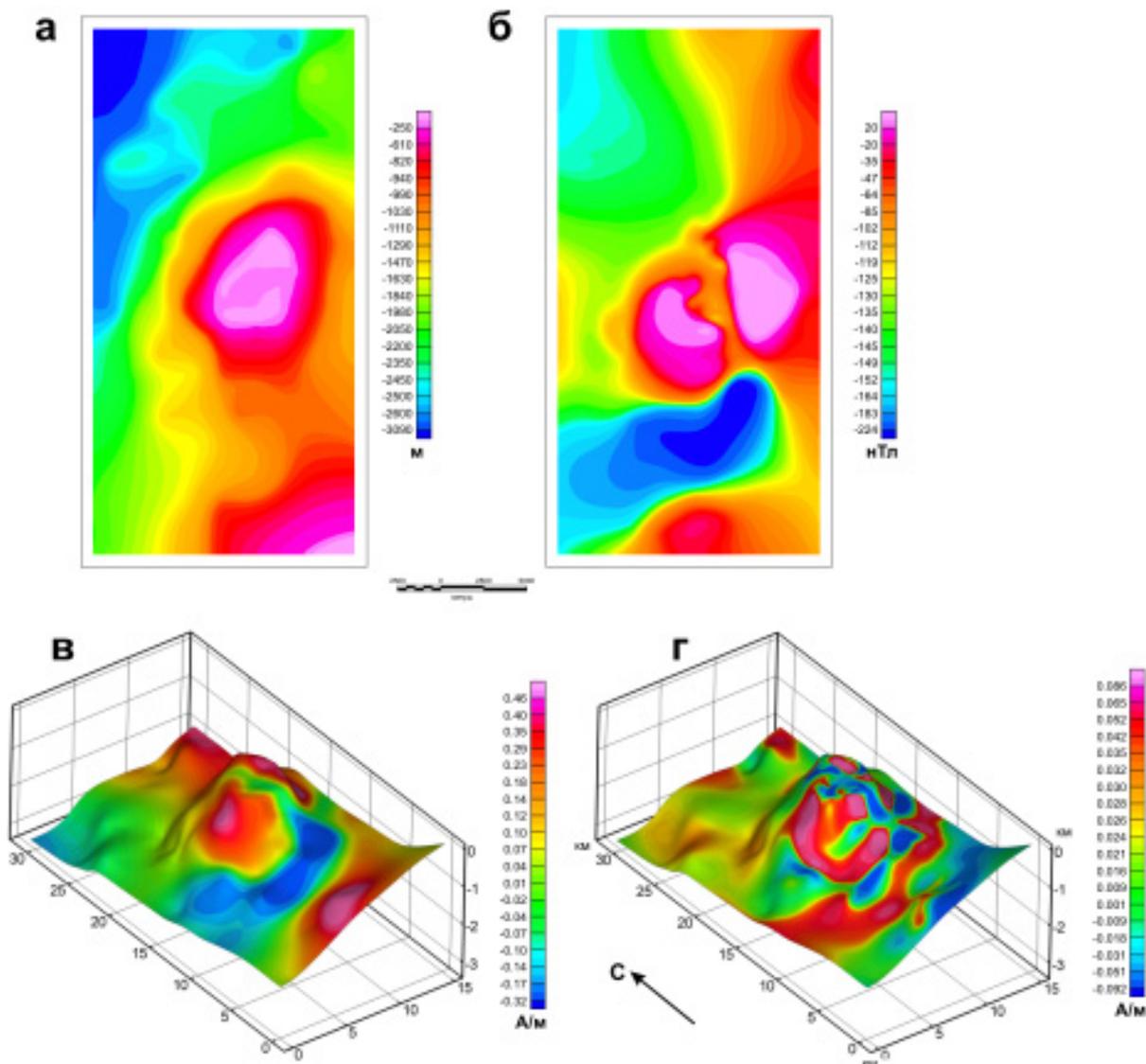


Рис. 3. Подводный вулкан Крылатка: *а* – батиметрия; *б* – аномальное магнитное поле ΔT_a ; *в* – распределение эффективной намагниченности вулкана, изображенное на поверхности вулкана; *г* – распределение локальной эффективной намагниченности, изображенное на поверхности вулкана.

преимущественно, плотными эффузивными или экструзивными породами. Осадочные отложения на склонах не фиксируются. Основание постройки с севера и запада покрыто осадочными отложениями мощностью до 700 м, залегающими субгоризонтально. Это свидетельствует о ее относительной древности. Размер перекрытого основания – 14x22 км. Полная высота, с учетом перекрытого осадками основания, ~ 2900 м, а объем постройки ~ 140 км³ (Подводный..., 1992; Рашидов, Бондаренко, 2004).

На записях эхолотных промеров в центре плоской вершины подводного вулкана Крылатка в интервале глубин 210–250 м отмечены акустические аномалии в водной толще, которые, возможно, могут быть вызваны газогидротермальной деятельностью.

При драгировании постройки вулкана подняты базальты, андезибазальты, андезиты, андезидациты и риолиты. Андезидациты часто имеют экструзивный облик (Ерохов и др., 1975, Остапенко и др., 1986; Подводный..., 1992).

Остаточная намагниченность драгированных базальтов изменяется в диапазоне 0.08–8.83 А/м, магнитная восприимчивость – в диапазоне $(18.6–54.4) \times 10^{-3}$ СИ, а отношение Кенигсбергера – в диапазоне 0.12–22.40.

Подводный вулкан Крылатка расположен в области развития отрицательного магнитного поля ΔT_a (рис. 3б). Основание вулкана оконтуривают отрицательные изолинии аномального магнитного поля интенсивностью 100–130 нТл. К западу, юго-западу и югу привершинной части постройки приурочена положительная локальная аномалия,

достигающая 96 нТл, а к востоку привершинной части и восточному склону — локальные положительные аномалии интенсивностью 230 и 150 нТл. Над привершинной частью постройки наблюдается смена характера аномального магнитного поля от плавного к высокочастотному. Высокочастотное аномальное магнитное поле может быть обусловлено наличием молодых лавовых потоков.

Аномалии, приуроченные к постройке подводного вулкана Крылатка, имеют субмеридиональное простирание, а отрицательные аномалии, развитые к югу от постройки — северовосточное и субширотное.

При проведении 2.5-мерного моделирования по методике, предложенной в работе (Лойтер и др., 1988), установлено, что аномальное магнитное поле подводного вулкана Крылатка обусловлено его современным рельефом. Роль «глубинных корней» вулкана практически незаметна. Породы, слагающие постройку подводного вулкана, намагничены по направлению современного магнитного поля. Эффективная намагниченность пород соответствует породам андезибазальтового ряда.

В интервале глубин 180–700 м наибольший вклад в структуру аномального магнитного поля вносят северо-восточный и юго-западный склоны подводного вулкана. Центральная часть вулканической постройки в этом же интервале является практически немагнитной. Вероятно, породы, слагающие центральную часть вулканической постройки в интервале глубин 180–700 м, подверглись значительным гидротермальным изменениям и, в результате чего, утратили свои магнитные свойства. Возможно, что этот слабо намагниченный блок, исходя из его размеров и состава драгированных пород, представляет собой вершинную кальдеру, заполненную продуктами разрушения верхней части постройки и консолидированным галечником (Рашидов, Бондаренко, 2004).

Расчеты, выполненные с помощью пакета программ структурной интерпретации СИГМА-3D, показали, что в центральной части подводного вулкана Крылатка эффективная намагниченность действительно очень мала, и слагающие ее породы утратили свои магнитные свойства (рис. 3в, 3г), что подтверждает сделанные ранее выводы. Среднеквадратическая погрешность подбора составила 10 нТл. При этом следует отметить достаточно хорошее совпадение результатов 2.5D и 3D моделирования, хотя в трехмерном случае модель становится более дифференцированной и отражающей тонкие детали строения вулкана. В частности, на его склонах выделяются отдельные лавовые потоки.

Острровершинный подводный вулкан Юбилейный расположен в пределах Симуширской поперечной вулканической зоны на восточном краю

Курильской глубоководной котловины, в 30 км к северо-западу от о. Кетой и в 44 км от вулканического фронта. В «Каталог подводных вулканов и гор Курильской островной дуги» вулкан вошел под номером 5.1 (Подводный..., 1992). Камчатские вулканологи считали, что они первыми обнаружили этот вулкан в 24-ом рейсе НИС «Вулканолог» в 1985 г. и назвали его в честь 50-летия Советской вулканологии (Подводный..., 1992; Федотов и др., 1986).

Однако ранее этот вулкан был обнаружен сахалинскими учеными — его местоположение показано в работе (Сергеев..., 1976). В работах (Gnibidenko, 1985; Gnibidenko, Svarichevsky, 1984) вулкан уже назван «Случайный». В то же время, по данным (Кичина и др., 1980), название «Случайный» было присвоено другому подводному вулкану, обнаруженному в 15-ом рейсе НИС «Пегас» в 1977 г. и находящемуся на расстоянии 40 км от северо-запада от северной оконечности о. Симушир.

Во избежание возможной путаницы мы предлагаем закрепить в дальнейшем за описываемым вулканом название Юбилейный.

Вулкан возвышается над дном Курильской котловины на 2900 м, а минимальная глубина, зафиксированная над его вершиной, составляет 420 м. Размер основания вулкана 17.5x19 км (рис. 4а). Крутизна склонов увеличивается от подножия ($7-10^\circ$) к вершине ($15-20^\circ$, местами до 30°). Объем вулканической постройки ~ 250 км³.

В 24-ом рейсе НИС «Вулканолог» с нижних горизонтов вулканической постройки драгированы гидротермальноизмененные туфы. Со склонов и вершины вулкана подняты свежие оливин-пироксеновые и пироксеновые андезибазальты. По трещинам в обломках пород нередко развиты желтые выделения серы. В андезибазальтах отмечены мелкие включения оливинового состава, нередко отороченные пироксен-амфиболовыми габброидами. Вокруг включений иногда наблюдается шлаковидная корка (Подводный..., 1992).

В привершинной части постройки опробованы также свежие пироксен-амфиболовые андезидациты экструзивного облика. Породы содержат значительное количество включений гомогенного типа, по своему составу варьирующих от базальтов до андезитов. Контакты включений с вмещающими породами резкие. Андезидациты в контактной зоне нередко вспученные, пемзовидные (Подводный..., 1992).

Мощность пирокластических отложений на склонах вулкана достигает 300–400 м. Подножие вулкана практически не перекрыто осадками. На отдельных участках склонов и привершинной части постройки выявлены выходы эффузивных и экструзивных пород. Отмечены каньонообраз-

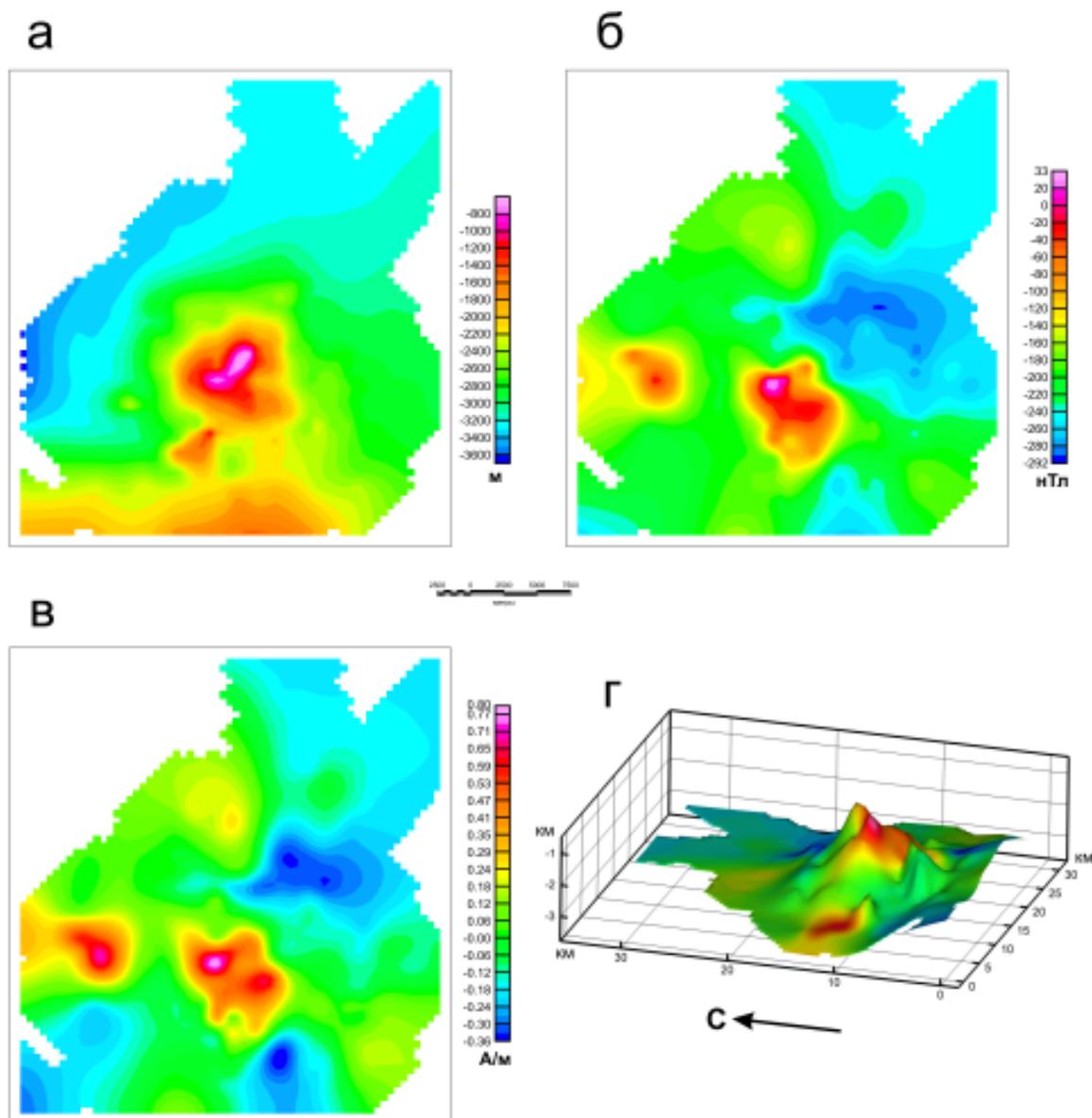


Рис. 4. Подводный вулкан Юбилейный: *а* – батиметрия; *б* – аномальное магнитное поле ΔT_a ; *в* – распределение эффективной намагниченности вулкана; *г* – распределение эффективной намагниченности, изображенное на поверхности вулкана.

ные углубления в рельефе, которые, возможно, маркируют края лавовых потоков или имеют эрозионное происхождение.

На склонах вулкана развиты побочные вулканические конусы. Относительная высота этих конусов – 100-120 м. Они расположены в пределах линейной зоны северо-западного простирания и, возможно, маркируют разлом в земной коре (Надежный..., 1988).

Вулкан Юбилейный отчетливо проявляется в магнитном поле. К нему приурочена положительная аномалия магнитного поля интенсивностью 300 нТл, максимум которой несколько смещен к югу от вершины постройки (рис. 4б). Вулкан намагничен по направлению современного магнитного поля.

В результате трехмерного моделирования с помощью программы REIST аномальное поле было аппроксимировано со среднеквадратической погрешностью 22 нТл.

Выявлено более сложное строение привершинной части вулкана размером 4х1.5 км (по изобате 800 м). Здесь отмечены две вершины – северо-восточная и юго-западная, расположенные, соответственно, на глубинах 420 и 700 м. На склонах вулкана в интервале глубин от 1100 до 2500 м находятся 7 побочных лавовых конусов. Самый большой из них, расположенный к юго-западу от привершинной части на глубине 1100 м, имеет относительную высоту ~ 420 м и размер основания ~ 1000 м.

Вершины вулкана и побочные конусы характеризуются повышенными значениями намагниченности, что свидетельствует об однотипности слагающих их пород (рис. 4в, 4г).

Морфологические особенности постройки, намагниченность ее по направлению современного магнитного поля и свежесть драгированных пород, относящихся к единой петрографической группе, отсутствие осадочных отложений, перекрывающих основание вулкана, свидетельствуют о молодом, возможно, голоценовом, возрасте подводного вулкана Юбилейный.

Исходя из морфологических особенностей лав, можно предположить, что андезибазальты, драгированные со склонов вулкана, изливались в подводных условиях. С вершины вулкана подняты андезибазальты, слагающие экструзивное тело, венчающее вулканическую постройку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные при изучении подводных вулканов Курильской островной дуги: Григорьева, Крылатка и Юбилейный, показали эффективность пакета программ структурной интерпретации СИГМА-3D.

Отмеченная на юго-западном склоне подводного вулкана Григорьева цепочка скальных выступов северо-восточного простирания диагностирована как цепочка экструзивных куполов или побочных лавовых конусов, развитых на радиальной трещине северо-восточного простирания.

В привершинной части подводного вулкана Крылатка выделен немагнитный блок, являющийся, вероятнее всего, либо вершинной кальдерой, либо участком гидротермально-измененных пород, а также отдельные лавовые потоки.

Показано, что вулкан Юбилейный имеет две вершины, а на его склонах выявлено 7 побочных конусов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 05-05-65102), ДВО РАН (проект 05-3-А-08-104) и ведущих научных школ (проект №-НШ-2294.2003.5).

Список литературы

Абдурахманов А. И., Пискунов Б.Н., Смирнов И.Г., Федорченко В.И. Вулкан Алайд (Курильские острова) // Восточно-Азиатские островные системы (Тектоника и вулканизм). Южно-Сахалинск, 1978. С. 85 – 107.

Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. и др. Подводная газогидротермальная активность на Северо-Западном склоне о. Парамушир (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 66-81.

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Буш В.А. и др. Методология картирования внутренней структуры фундамента Восточно-Европейской платформы по гравимагнитным данным // Доклады международной геофизической конференции «Геофизика XXI века – прорыв в будущее» М: ЕАГО. 2003а. С. 102-203.

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусков А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. 2003б. № 4. С. 37-40.

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусков А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. 2003в. № 6. С. 55-58.

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусков 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.

Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы // Под ред. К.С. Сергеева, М.Л. Красного. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 листов.

Ерохов В.Ф., Кичина Е.Н., Остапенко В.Ф. Петрохимические особенности лав подводных вулканов Курильских островов // Труды СахКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1975. Вып. 35. С. 21-26.

Кичина Е.Н., Неверов Ю.Л., Остапенко В.Ф. Новые данные о подводных вулканах акватории острова Симушир (Курильские острова) // Геология дна северо-запада Тихого океана. Владивосток: САХКНИИ ДВО АН СССР, 1980. С. 61-66.

Лойтер П.П., Карсаков Л.П., Мальшев Ю.Ф. Связь магматогенных рудоконтролирующих структур с глубинным строением Западного Приохотья // Тихоокеанская геология. 1988. № 6. С. 82-94.

Надежный А.М. Сейсмоакустические исследования на новом подводном вулкане в системе Курильской островной дуги // Вулканологические исследования на Камчатке. Тезисы докладов Конференции молодых ученых. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии ДВО РАН, 1988. С. 69-73.

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.

Остапенко В.Ф., Вольнев В.М., Кичина Е.Н., Калинин А.И. Подводный вулкан Крылатка (Охотское море) // Геологическое и геохимическое исследование Охотоморского региона и его обрамление. Владивосток, 1986. С. 18-24.

Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Пущаровский Ю.М. М.: Наука, 1992. 528 с.

Рашидов В.А. Геомагнитные исследования подводных вулканов северной части Курильской островной дуги // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 300-315.

Рашидов В.А., Бондаренко В.И. Геофизические исследования подводного вулкана Крылатка (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 65-76.

Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 239 с.

Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.

Федотов С.А., Иванов Б.В., Гущенко И.И. и др. Вулканическая деятельность в Курило-Камчатской зоне в 1980-1984 гг. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 2. С. 3-20.

Gnibidenko G.S. The Sea of Okhotsk-Kurile Islands ridge and Kurile-Kamchatka trench // The ocean basins and margins. N.Y.; L.: Plenum press, 1985. Vol. 7A: The Pacific Ocean. P. 377-418.

Gnibidenko G.S., Svarichevsky A.S. Tectonics of the South Okhotsk Deep-Sea Basin // Tectonophysics. 1984. V. 102. P. 225-244.

APPLICATION OF THE SIGMA-3D SOFTWARE PACKAGE FOR STRUCTURAL INTERPRETATION SUBMARINE VOLCANOES OF THE KURILE ISLAND ARC

P. S. Babayanz¹, Y. I. Blokh², V. I. Bondarenko³, V. A. Rashidov⁴, A. A. Trusov¹

¹ *Aerogeophysics 107140, Moscow, N. Krasnoselskaya Street, 4; e-mail: bab@aerogeophysics.com;*

² *Russian State Geological Prospecting University 117873, Moscow, Miklucho-Maklaya Street, 23; e-mail: yuri_blokh@mail.ru*

³ *State Nekrasov University of Kostroma, 156000, Kostroma, 1st May Street, e-mail: vbond@list.tu;*

⁴ *Institute of Volcanology and Seismology, FED RAS, 683006 Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip Blvd., 9, Fax: (415-22)59130; e-mail: rashidya@kcs.iks.ru*

SIGMA-3D software package of structural interpretation is an effective tool for the automated three-dimensional modeling while studying magnetic anomalies created by underwater volcanoes. With the help of this software package submarine volcanoes Grigorieva, Krylatka, and Yubileiny, located in the Kurile island arc, have been studied.