

УДК 550.8

Е.А. БЕССОНОВА, В.М. НИКИФОРОВ, С.А. ЗВЕРЕВ,
А.А. КОПТЕВ, В.Б. ЗАЛИЩАК

Аномальное магнитное поле северо-западной части залива Петра Великого (Японское море)

Магнитное поле северо-западной части зал. Петра Великого характеризуется положительными и отрицательными магнитными аномалиями, которые имеют независимую структуру и обусловлены различными источниками. Положительные магнитные аномалии, как правило, связаны с интрузивными образованиями основного состава верхнепермского возраста. Отрицательная магнитная аномалия Амурского залива отражает влияние кайнозойских отложений, намагниченность которых в зоне повышенной проницаемости фундамента сформирована в начале миоцена и соотносится с кайнозойским этапом магматизма.

Ключевые слова: аномальное магнитное поле, залив Петра Великого.

Abnormal magnetic field of the North-West part of Peter the Great Bay (Sea of Japan). E.A. BESSONOVA, V.M. NIKIFOROV, S.A. ZVEREV, A.A. KOPTEV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok), V.B. ZALISHCHAK (Far Eastern Federal University, Vladivostok).

Magnetic field of the North-West part of Peter the Great Bay is characterized by positive and negative magnetic anomalies, which have an independent structure and are caused by different sources. Positive magnetic anomalies are usually associated with intrusive formations of the basic structure of the Upper Permian age. Negative magnetic anomaly of the Amur Bay reflects the influence of the Cenozoic sediments whose magnetization in the zone of high permeability of the foundation is formed at the beginning of the Miocene and corresponds with the Cenozoic phase of magmatism.

Key words: abnormal magnetic field, Peter the Great Bay.

Изучение аномального магнитного поля и магнитных свойств пород, слагающих острова и дно зал. Петра Великого (Японское море), имеет важное значение для выяснения характера сочленения окраинно-морских и континентальных структур. В этой части зоны сочленения существует возможность отождествления конкретных аномалий магнитного поля с геологическими телами, установления их природы, выявления особенностей морфологии и т.д. Обнаруженные таким образом закономерности в дальнейшем могут быть использованы для интерпретации магнитных аномалий на удалении от береговой линии, где аномалеобразующие объекты перекрыты слоем водных масс. Результаты геомагнитных исследований в северо-западной части зал. Петра Великого дают возможность более определенно использовать магнитометрические методы для изучения геологического строения зоны перехода окраинное море–континент.

*БЕССОНОВА Елена Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, НИКИФОРОВ Валериан Митрофанович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ЗВЕРЕВ Сергей Александрович – младший научный сотрудник, КОПТЕВ Андрей Анатольевич – ведущий инженер-электроник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), ЗАЛИЩАК Владимир Борисович – старший преподаватель (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). *E-mail: bessonova@poi.dvo.ru

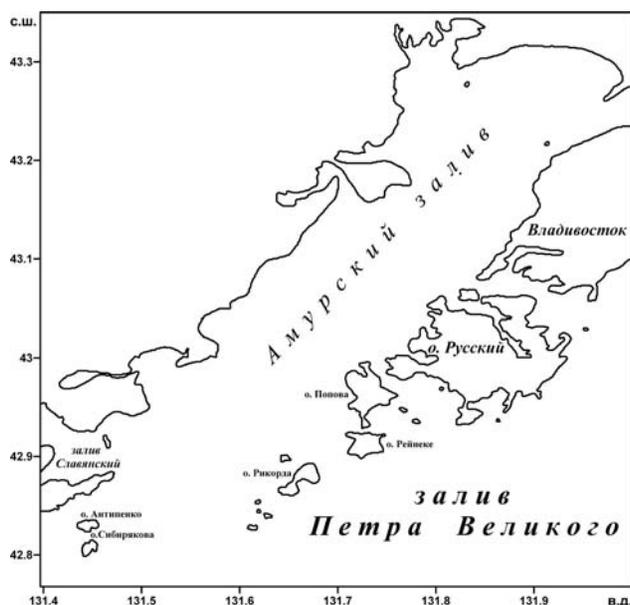


Рис. 1. Обзорная карта района работ

Результаты изучения глубинного строения земной коры зал. Петра Великого представлены в работах [2–4, 7 и др.]. Эти исследования были направлены на изучение зоны перехода от Южно-Приморского шельфа к глубоководной Центральной котловине. На отдельных участках прибрежного шельфа для картирования магнитоактивных объектов в конце 1980-х годов была выполнена аэромагнитная съемка масштабов 1 : 25 000¹, 1 : 50 000 и 1 : 100 000 [6]. Однако точность геодезической привязки и технические характеристики используемой ранее измерительной аппаратуры ограничивали возмож-

ности исследователей. Детальные геофизические работы, направленные на выявление особенностей строения поверхности фундамента акваторий Амурского залива и островной части зал. Петра Великого, практически не проводились.

В комплексе геофизических работ на акваториях ведущее место занимает гидромагнитная съемка. При этом изучение геомагнитных аномалий островных территорий Попова, Рейнеке, Рикорда, Антипенко, Сибириякова, расположенных в северо-западной части зал. Петра Великого (рис. 1), является хорошей основой для построения геомагнитной модели геологической среды акватории, поскольку именно на островах возможна прямая увязка геологических данных с аномальным магнитным полем.

Геофизические работы на островах выполнены в 2004–2010 гг. Они включали площадную магнитную съемку масштаба 1 : 5 000, измерения магнитной восприимчивости горных пород в естественном залегании. Намагниченность образцов горных пород определялась также в лабораторных условиях. На участках с высокими градиентами магнитного поля выполнена магнитная съемка масштаба 1 : 500. Детальные гидромагнитные съемки на акватории северо-западной части зал. Петра Великого проводились в 2007–2012 гг., причем работы выполнялись таким образом, чтобы сеть наблюдений с учетом предыдущих работ обеспечила кондиционный набор данных для построения карты аномального магнитного поля на площади, включающей острова и акваторию. На основе интерпретации результатов этих исследований построена геомагнитная модель геологической среды района исследований.

Измерения модуля полного вектора геомагнитного поля осуществлялись протонными магнитометрами. Повышение точности морских геомагнитных измерений и точности географической привязки точек наблюдений достигнуто за счет использования современного геодезического оборудования и разработанных в лаборатории электрических и магнитных полей и лаборатории гравиметрии ТОИ ДВО РАН регистрирующего оборудования, программного обеспечения и приемов обработки данных.

¹ Жуковская А.В. Результаты аэрогеофизических работ м-ба 1 : 25 000 на участке Муравьевском по работам Аэрогеофизической партии за 1987–1989 гг. / Приморский ТГФ. Владивосток, 1989.

Аномальное магнитное поле

По данным гидромагнитных и пешеходных съемок составлена карта аномального магнитного поля (АМП) северо-западной части зал. Петра Великого масштаба 1 : 200 000 (рис. 2). АМП прибрежной акватории залива неоднородно. Акватория Амурского залива характеризуется отрицательной аномалией, высокоградиентный участок которой расположен в ее юго-восточном замыкании, вблизи о-ва Попова. Интенсивность аномалии плавно убывает в северо-западном направлении. Острова и акватория, расположенные восточнее, в АМП отражены высокоамплитудными мозаичными положительными аномалиями. Генерализованное простираение аномальных зон северо-восточное, согласно общему простираению современных геологических структур обрамления Амурского залива. Положительные и отрицательные магнитные аномалии имеют независимую структуру и связаны с различными источниками.

Территория островов Попова, Рейнеке, Рикорда характеризуется высокоградиентным АМП (рис. 3, см. вклейку).

АМП о-ва Попова свойственно структурам центрального типа. Положительные аномалии магнитного поля расположены по периферии острова и в плане образуют разомкнутый в юго-восточной части овал, вытянутый в субмеридиональном направлении. В центральной части острова, на юге и юго-востоке АМП характеризуется небольшими отрицательными значениями. В пределах рассматриваемой территории выделяются два основных морфологических типа положительных магнитных аномалий. В северной части острова преобладают мозаичные контрастные, вытянутые в субмеридиональном направлении аномалии с амплитудами до 4000 нТл. Такие аномалии приурочены, как правило, к водораздельным участкам. В центральной части и на юге острова аномалии магнитного

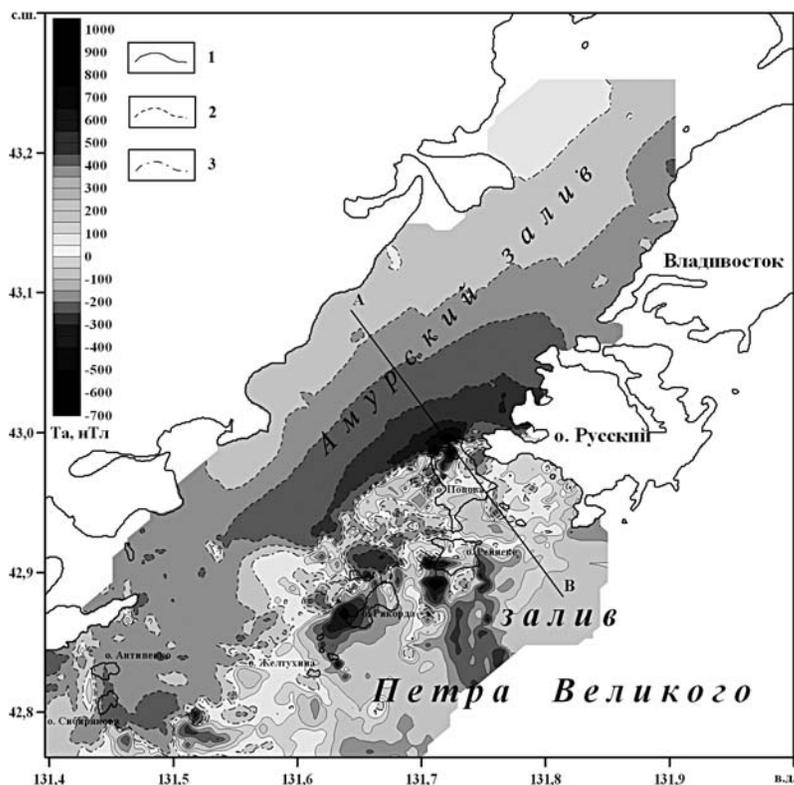


Рис. 2. Аномальное магнитное поле северо-западной части прибрежной акватории зал. Петра Великого. Изоинтенсивности T_a : 1 – положительные, 2 – отрицательные, 3 – нулевые. М-б 1 : 200 000

К статье Д.В. Черных, А.С. Саломатина, В.И. Юсупова,
Н.Е. Шаховой, В.И. Сергиенко, Д.А. Космач, А.А. Мелузова, И.П. Семилетова
«Количественная акустическая оценка потоков метана с припайного льда
на мелководном Восточно-Сибирском шельфе»

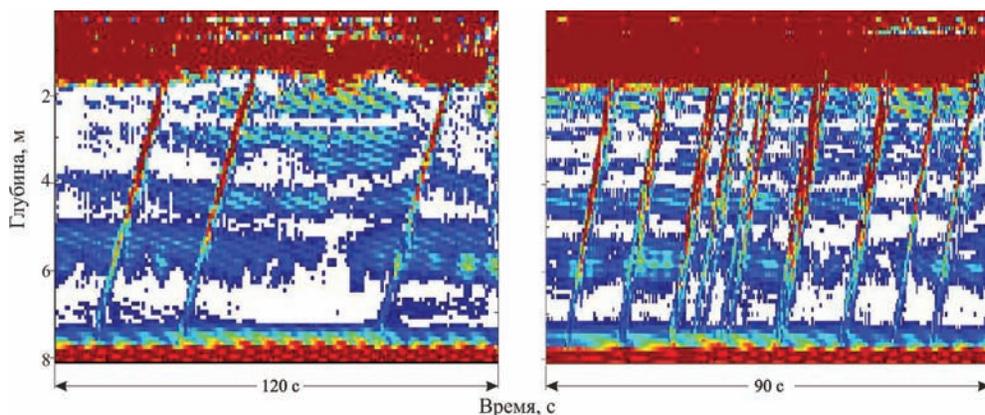


Рис. 5. Типичные примеры эхограмм со всплывающими с морского дна пузырьками метана в периоды повышенной активности

К статье Е.А. Бессоновой, В.М. Никифорова, С.А. Зверева, А.А. Коптева, В.Б. Залищак
«Аномальное магнитное поле северо-западной части залива Петра Великого
(Японское море)»

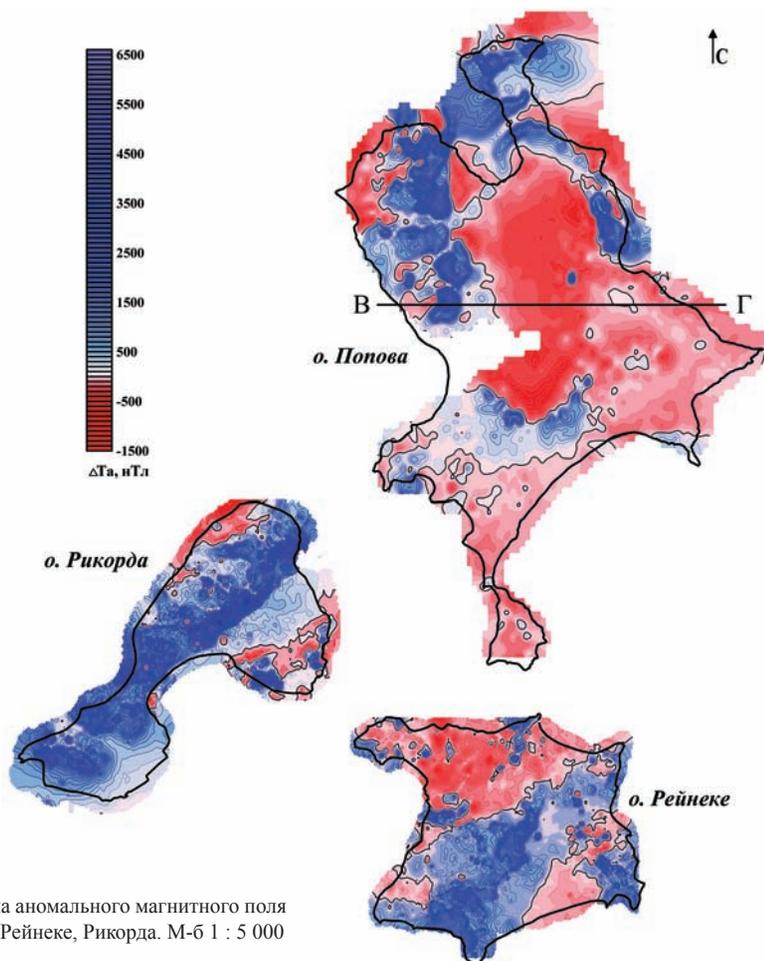


Рис. 3. Карта-схема аномального магнитного поля островов Попова, Рейнеке, Рикорда. М-6 1 : 5 000

поля сглаженные, относительно слабо дифференцированные с амплитудами до 1500 нТл, они простираются в северо-восточном направлении.

На о-ве Рейнеке положительная аномалия магнитного поля интенсивностью до 2800 нТл протягивается в диагональном направлении с северо-востока на юго-запад. В центральной части АМП характеризуется высокими градиентами, на побережье магнитное поле сглаженное. В северной части острова преобладают интенсивные отрицательные аномалии. Небольшие по площади положительные аномалии изометричной формы отмечены на западе и на юго-востоке острова. На юго-западе с западной стороны и юго-востоке с южной стороны о-ва Рейнеке выделены отрицательные аномалии магнитного поля с амплитудами до -400 нТл.

АМП о-ва Рикорда высокоградиентно и характеризуется в основном положительными значениями до 6500 нТл. Положительная аномалия магнитного поля протягивается через весь остров с северо-востока на юго-запад. В южной части она осложнена локальными аномалиями субширотного простираения. К водораздельным участкам на севере и юге острова приурочены мозаичные положительные аномалии. На западном и восточном побережье северной части острова АМП имеет отрицательные значения.

АМП островов Антипенко и Сибирякова, расположенных в южном замыкании Амурского залива, характеризуется низкоамплитудными отрицательными аномалиями интенсивностью до -300 нТл.

Петромагнитные исследования

Интерпретация АМП северо-западной части зал. Петра Великого базируется на многочисленных (более 8000) измерениях магнитной восприимчивости (α) горных пород в естественном залегании (береговые обнажения островов Попова, Рикорда, Рейнеке, Антипенко и Сибирякова), а также на измерениях намагниченности образцов горных пород в лабораторных условиях.

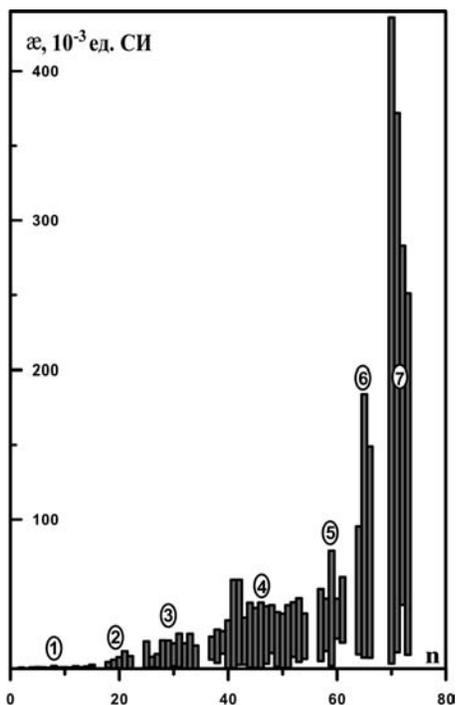


Рис. 4. Магнитная восприимчивость петромагнитных комплексов магматических пород островов Попова, Рикорда, Рейнеке. 1–7 – петромагнитные комплексы (описания см. в тексте статьи)

Разделение магматических пород островных территорий на петромагнитные комплексы выполнено по максимальным, минимальным и средним значениям магнитной восприимчивости по мере ее возрастания (рис. 4). Критериями разделения являются существенные различия максимальных и средних значений α у различных групп и выдержанность этих характеристик в пределах группы.

В первый петромагнитный комплекс объединены магматические породы следующих петрографических групп: эффузивы кислого, среднего и основного состава, близповерхностные фации гранитов, микрозернистые разновидности габброидов, ороговикованные в процессе гранитизации. Диапазон значений α для этих групп пород составляет $(0,03-2,62) \times 10^{-3}$ ед. СИ, среднее значение $0,47 \times 10^{-3}$ ед. СИ.

Второй петромагнитный комплекс включает только граниты седанкинского комплекса и характеризуется магнитной восприимчивостью от $0,1 \times 10^{-3}$ до $11,7 \times 10^{-3}$ ед. СИ при

среднем значении $2,14 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Выделение этих пород в отдельную группу объясняется тем, что максимальное и среднее значения магнитной восприимчивости на порядок выше, чем у горных пород первого петромагнитного комплекса.

В третий петромагнитный комплекс объединены интрузивные образования кислого и основного (лейкократовое габбро) состава, эффузивы среднего и основного состава. Эти породы в среднем намагничиваются в 2 раза интенсивнее, чем породы второго петромагнитного комплекса ($\alpha_{\min} = 0,17 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\max} = 26,2 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\text{cp}} = 5,31 \times 10^{-3}$ ед. СИ).

В четвертый, наиболее представительный петромагнитный комплекс ($\alpha_{\min} = 0,32 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\max} = 47,2 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\text{cp}} = 18,48 \times 10^{-3}$ ед. СИ) выделены кислые, основные и переходные разновидности интрузивов, эффузивы основного и среднего состава.

В пятый петромагнитный комплекс ($\alpha_{\min} = 1,8 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\max} = 61,4 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\text{cp}} = 33,77 \times 10^{-3}$ ед. СИ) включены среднекристаллические серые граниты, гранитизированное габбро, меланократовое мелкокристаллическое габбро и андезитобазальты.

Наиболее магнитным является шестой комплекс, представленный только меланократовыми разностями интрузивных пород основного состава ($\alpha_{\min} = 7,33 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\max} = 184 \times 10^{-3}$, $\alpha_{\text{cp}} = 57,1 \times 10^{-3}$ ед. СИ). В составе среднезернистого амфиболитизированного габбро, широко распространенного на о-ве Попова, среднее содержание магнитных минералов, представленных аксессуарным титаномагнетитом и вторичным магнетитом, составляет 10–15%, причем магнетит относится к вкрапленным новообразованиям, размеры которых в отдельных случаях достаточно велики – до 2 мм. Его содержание в 2 раза выше, чем магматического титаномагнетита.

В результате исследований установлено, что на величину магнитной восприимчивости существенное влияние оказывают вторичные гидротермально-метасоматические и гипергенные процессы. Они приводят не только к разрушению или окислению первичных ферромагнитных минералов с образованием менее магнитных разновидностей, но и к новообразованию ферромагнетиков. Максимальные значения магнитной восприимчивости габбро связаны с зонами развития гидротермального жильного магнетита, который установлен в бухте Алексева и на южном склоне бухты Западная (о-в Попова), а также в северной части о-ва Рикорда. Максимальные значения магнитной восприимчивости здесь составляют 372×10^{-3} (о-в Попова) и 436×10^{-3} ед. СИ (о-в Рикорда). Мощность жил, содержащих гидротермальный магнетит, достигает 15–20 см. В центральной части о-ва Рикорда отмечены аномально высокие значения магнитной восприимчивости в дацитах (до 320×10^{-3} ед. СИ). В зоне гидротермальных изменений визуально выявлены гнезда магнетита размерами 5–15 см. В седьмой петромагнитный комплекс выделены именно эти группы пород.

Направление вектора намагниченности позднепермских интрузивных образований основного состава, исследованных на островах Попова, Рейнеке, Рикорда, совпадает с таковым современного магнитного поля; коэффициент Кёнигсбергера (Q) не превышает 1, максимальная величина намагниченности 402×10^{-2} А/м.

Острова Антипенко и Сибирякова сложены слабомагнитными андезитами, андезидацитами славянской толщи ($\alpha = (2-3) \times 10^{-3}$ ед. СИ), верхняя возрастная граница которой соответствует началу миоцена (22,9 млн лет) [5]. Вектор остаточной намагниченности этих вулканитов имеет обратное современному полю направление, а величина ее составляет $(5-22) \times 10^{-2}$ А/м.

Количественная интерпретация АМП

Количественная интерпретация АМП островов Попова, Рикорда, Рейнеке, характеризующихся схожим геологическим строением, выполнена на основе двухмерного моделирования и пересчетов на различные уровни внешнего полупространства. Разрезы, аппроксимированные набором элементарных тел в виде многоугольных призм с постоянной

намагниченностью, размеры которых выбирались с учетом масштаба выполненной съемки, были представлены в работе [1]. При вычислениях сделано допущение о сонаправленности векторов намагниченности модельных тел и современного магнитного поля. Значения намагниченности вычислены по магнитной восприимчивости с учетом фактора Q интрузивных пород п-ова Муравьев-Амурский.

Для выяснения особенностей распределения магнитных масс в верхней части разреза реализована процедура разделения АМП на локальную и региональную составляющие. За региональную составляющую приняты результаты пересчета на высоту 500 м. Остаточные аномалии ($\Delta T_{\text{лок.}} = \Delta T_a - T_h$, где h – высота пересчета, ΔT_a – АМП) позволяют выявить аномальные эффекты, создаваемые особенностями строения верхней части геологической среды. Обобщенный «разностный» разрез субширотной ориентировки построен по профилю (В–Г) в центральной части о-ва Попова (рис. 3, 5). В центральной части профиля остаточные аномалии характеризуются отрицательными значениями (до -600 нТл), на востоке и западе они положительные (до 1500 нТл) с резкими градиентами и характерными односторонними минимумами во внутренней части профиля. На разрезе положительные аномалии аппроксимированы вертикальными блоками шириной 50–150 м, намагниченность которых меняется в интервале $(50\text{--}300) \times 10^{-2}$ А/м. Подобранная намагниченность тел на участках отрицательных аномалий в центре и на периферии разреза составляет 10×10^{-2} А/м, горизонтальные размеры тел изменяются от 400 до 1000 м.

В результате количественной интерпретации установлена связь мозаичных положительных аномалий магнитного поля о-ва Попова с различной намагниченностью отдельных приповерхностных блоков габброидного массива. Сопоставление результатов натурных наблюдений, петрографического анализа и измерений магнитной восприимчивости габброидов позволяет сделать вывод о неравномерном распределении магнитных минералов (магнетита, титаномагнетита), связанном с дифференциацией магматического материала в процессе многофазного внедрения, а также с жильной магнетитовой минерализацией, возникшей в результате вторичных гидротермальных изменений. Профиль капаметрии, построенный по результатам измерений магнитной восприимчивости меланократового габбро в береговом обнажении о-ва Попова, показывает изменение α на протяжении 160 м (рис. 6). Значения исследуемого параметра в южной части профиля на 1–2 порядка отличаются от значений в северной части.

На интерпретационном профиле А–В, пересекающем Амурский залив, о-в Попова, а также юго-восток акватории, положительные аномалии связываются с массивами

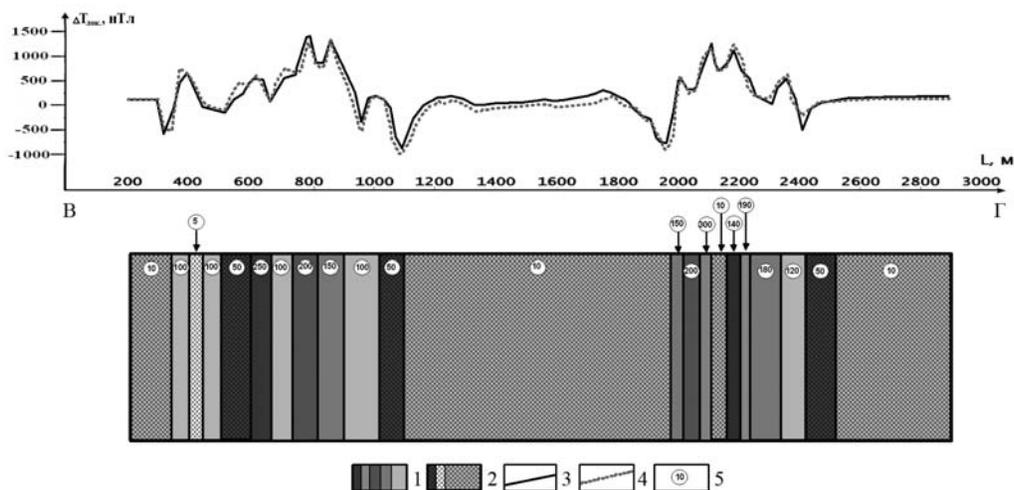


Рис. 5. Разрез по геомагнитному профилю В–Г в центральной части о-ва Попова (см. рис. 3). Усл. обозначения: 1 – граниты, 2 – габбро, 3 – аномальное магнитное поле, 4 – рассчитанное магнитное поле, 5 – намагниченность (10^2 А/м)

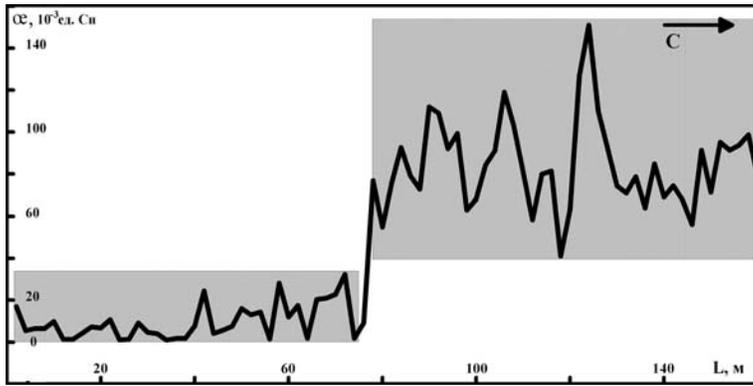


Рис. 6. Профиль капаметрии меланократового габбро в береговом обнажении (северо-восточная часть о-ва Попова)

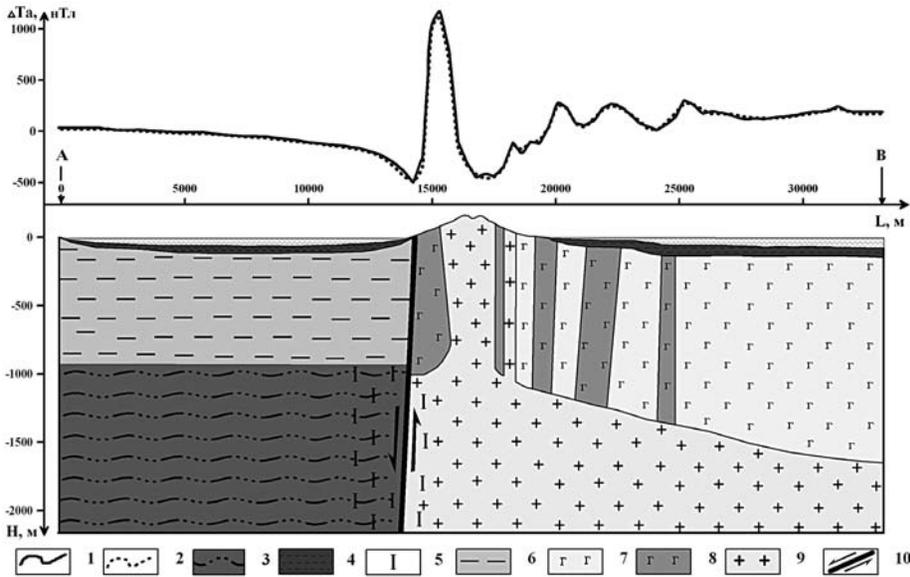


Рис. 7. Количественная интерпретация аномального магнитного поля по профилю А–В (см. рис. 2). Усл. обозначения: 1 – АМП; 2 – выбранное поле; 3 – домиоценовые литифицированные отложения, $(20-50) \times 10^{-2}$ А/м; 4 – позднекайнозойские отложения, $(0-20) \times 10^{-2}$ А/м; 5 – гидротермально измененные породы, намагниченность которых в значительной степени определяется остаточной компонентой, 0–50 мА/м; 6 – литифицированные отложения, $(0-50) \times 10^{-2}$ А/м; 7–9 – позднепермские интрузивные образования: 7, 8 – основного, $(150-250) \times 10^{-2}$ и $(250-400) \times 10^{-2}$ А/м, соответственно, 9 – кислого состава, $(50-150) \times 10^{-2}$ А/м; 10 – положение Муравьевского разлома

позднепермских габброидов (рис. 2, 7). Наиболее интересна отрицательная аномалия, расположенная в осевой части Муравьевского разлома, ограничивающего Амурский залив с юго-востока. Один из возможных вариантов ее интерпретации – неглубоко залегающее тело, характеризующееся обратной намагниченностью, сформированной в результате вторичных изменений под действием глубинного флюида. Канал поступления горячих гидротермальных флюидов расположен в осевой части Муравьевского разлома. Возраст изменений должен соответствовать началу миоцена (22,9 млн лет). Следует отметить, что в континентальном обрамлении Амурского залива активно проявлен раннемиоценовый–плиоценовый основной, реже кислый магматизм: здесь широко распространены вулканические покровы, входящие в состав славянской толщи, зайсановской и шуфанской свит. По-видимому, они имеют мощные корневые зоны. Именно этим возрастом датируются обратно намагниченные андезиты и андезитобазальты, которыми сложено дно Славянского

залива и островов Антипенко и Сибирикова [6]. Рассматриваемая территория в миоцене–плейстоцене отличалась очень высокой тектонической активностью, о чем свидетельствует наличие в этом районе многочисленных кайнозойских (часто угленосных) депрессий, выполненных молассовыми отложениями. Указанные особенности геологии Амурского залива и его континентального обрамления связаны с гималайским тектогенезом, в результате которого произошло раскрытие Японского окраинного моря.

Заключение

АМП северо-западной части зал. Петра Великого характеризуется положительными и отрицательными магнитными аномалиями, которые имеют независимую структуру и обусловлены различными источниками. Положительные магнитные аномалии, занимающие значительные площади на юго-востоке залива, как правило, связаны с магматическими образованиями верхнепермского возраста. Морфология, интенсивность и природа АМП на этом участке определяются прежде всего происхождением и особенностями размещения геологических тел с различным содержанием минералов магнетитового ряда. Мозаичная структура положительных аномалий обусловлена морфологическими особенностями верхней кромки аномалеобразующих тел и дифференцированностью намагниченности интрузивных образований основного состава. Неоднородность магнитных свойств отдельных блоков массивов габброидов является результатом сложной дифференциации магматических расплавов при их становлении, ассимиляции вмещающих пород, процессов гидротермальных изменений, метаморфизма и выветривания, которые привели к значительному изменению состава и количественного содержания магнитной фракции, в том числе к образованию аномально высокого содержания магнетита в зонах жильной минерализации.

Отрицательная магнитная аномалия Амурского залива отражает влияние магнитных масс мощной подводной толщи кайнозойских литифицированных отложений. Апикальной части этой аномалии соответствует положение в плане тела, перекрытого современными отложениями, намагниченность которого сформирована под действием горячего глубинного флюида в начале миоцена (22,9 млн лет). Возраст этих изменений соотносится с кайнозойским этапом магматизма, тесно связанного с деструкцией земной коры континентальной окраины Азии в процессе раскрытия впадины Японского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонова Е.А., Никифоров В.М., Залищак В.Б., Зверев С.А., Емельянова Т.А. Природа магнитных аномалий островов Попова, Рикорда, Рейнеке (залив Петра Великого, Японское море) // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / отв. ред. А.С. Астахов, В.Б. Лобанов. М.: ГЕОС, 2008. С. 340–354.
2. Ковылин В.Н., Строев П.Н. Основные структуры земной коры переходной зоны в области Японского моря // Морские гравиметрические исследования. 1973. Вып. 6. С. 86–102.
3. Кулинич Р.Г., Васильев Б.И., Строев П.А., Шевалдин Ю.В. Геолого-геофизические данные о строении шельфа и континентального склона залива Петра Великого (Японское море) // Вопросы геологии и геофизики окраинных морей северо-западной части Тихого океана. Магадан: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 134–143.
4. Кулинич Р.Г., Строев П.А. О строении земной коры в юго-западной части Приморского шельфа и континентального склона // Океанол. исследования. 1973. № 23. С. 97–101.
5. Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. и др. Кайнозойский магматизм Юго-Западного Приморья: импульсное плавление мантии и коры // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 6. С. 3–31.
6. Столов Б.Л., Киселев В.В., Шаромов А.М., Пименов Ю.Т. Опыт применения повысотных аэромагнитных съемок на участке шельфа залива Петра Великого // Геофизические исследования в Тихоокеанском регионе. Владивосток: Дальнаука, 1992. С. 117–139.
7. Шевалдин Ю.В., Головань А.А., Шевалдина С.В., Кудинов С.А., Лесков В.Н. О структуре геомагнитного поля и глубинном строении залива Петра Великого // Геофизика дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 13–25.