

**СТРУКТУРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ
(ПО ДАННЫМ ДЕТАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ)**

Е.А. Бессонова, Т.А. Емельянова, С.А. Зверев, Л.А. Изосов

*ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,
г. Владивосток, 690041; e-mail: bessonova@poi.dvo.ru; emelyanova@poi.dvo.ru; zverev_84@mail.ru; donkifa@mail.ru*

Поступила в редакцию 27 ноября 2020 г.

Результаты детальных геомагнитных исследований залива Петра Великого существенным образом меняют сложившиеся представления о структурных неоднородностях геологической среды. На основе классификации магнитных аномалий и петромагнитных характеристик горных пород получено новое понимание морфологии, глубин залегания и вещественного состава аномалообразующих источников. Обоснованно решены вопросы структурно-тектонического районирования центральной части залива: впервые выделен сместитель правого крыла Муравьевского горст-антиклинория, определена амплитуда поднятия и ширина горста.

Ключевые слова: аномальное магнитное поле, геомагнитное районирование, магнитная восприимчивость, количественная интерпретация, структурно-тектоническое районирование, залив Петра Великого, Муравьевский горст-антиклинорий.

ВВЕДЕНИЕ

Акватория залива Петра Великого является уникальным природным образованием, характеризующимся сложным геологическим строением. Материковый склон отступает от береговой черты, образуя отмель шириной 80–100 км (рис. 1) [14]. Геологическое строение этого участка представляет собой большой теоретический интерес как область, расположенная в зоне перехода от континентальных структур к океаническим. Острова, расположенные в центре залива, позволяют проследить особенности связи геологического строения побережья и дна акватории. Исключительная сложность геологического строения дна акватории залива и его островов в значительной степени затрудняет решение основных вопросов тектоники: распределение разломных зон, связь тектонических элементов с морфоструктурами дна и продолжение континентальных структур в глубокое море. Исследования аномального магнитного поля (АМП) являются неотъемлемой частью работ по составлению карт, отражающих особенности геологического строения и тектоники залива Петра Великого. В результате геомагнитных исследований акватории залива в разные годы были составлены региональные среднemasштабные карты АМП различной степени

точности, обусловившей ограничения при интерпретации магнитных аномалий и построении моделей магнитоактивных источников. Остались нерешенными вопросы внутренней структуры аномально намагниченных тел, характера постмагматических изменений, особенностей распределения рудной минерализации и т. п. Для решения этих задач необходимо создание физико-геологической модели, составленной с учетом изменения петрологических особенностей и магнитных характеристик геологического разреза. «Белым пятном» является мелководная акватория вблизи островов и побережья. Именно эти участки представляют собой ключ для понимания природы магнитных аномалий, необходимой для повышения достоверности интерпретации геомагнитных карт залива Петра Великого. Для уменьшения многозначности при решении обратной задачи магниторазведки классическими методами актуально использование крупномасштабного геомагнитного картирования и детальных измерений магнитных свойств геологической среды на мелководной акватории вблизи побережья и островах залива Петра Великого.

В 2005–2017 гг. для получения новых данных о структуре аномального магнитного поля и выявления особенностей взаимоотношений намагниченных объ-

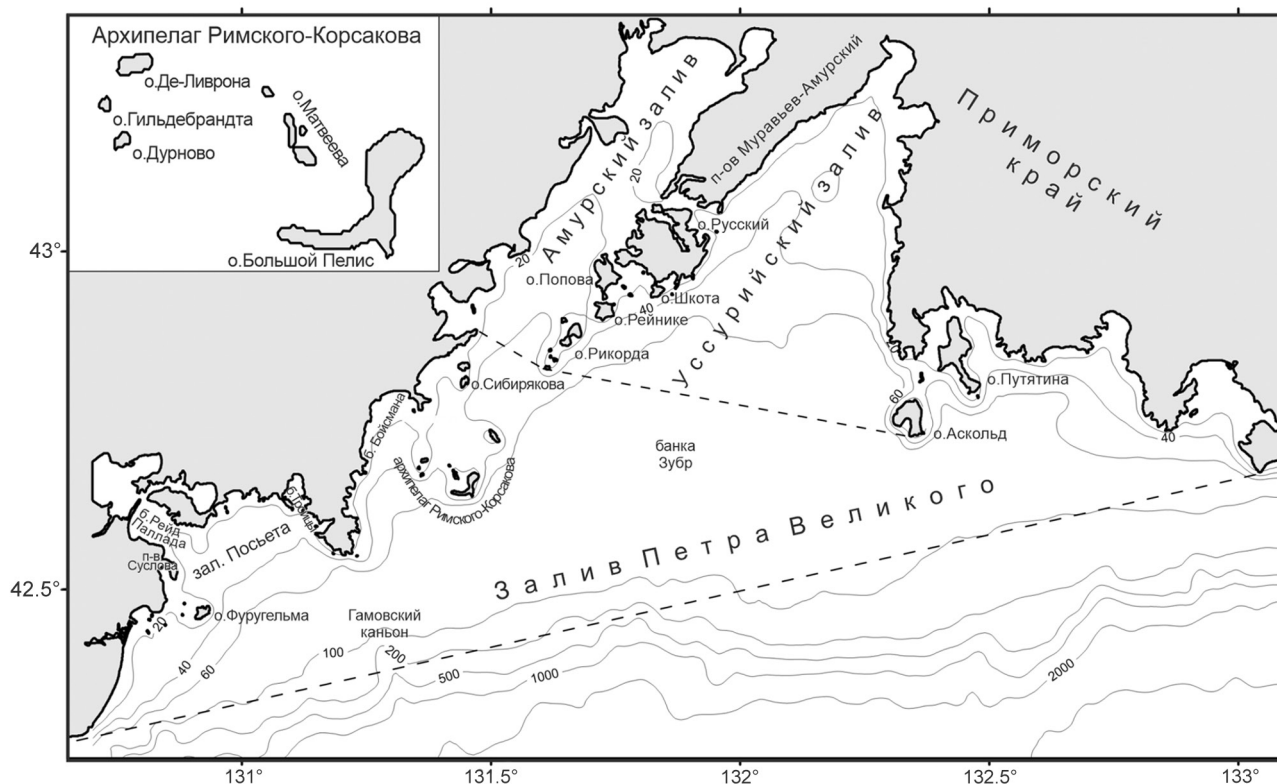


Рис. 1. Обзорная карта участка исследований и рельеф дна.

Пунктиром показаны внешние границы залива Петра Великого, Амурского и Уссурийского заливов.

ектов – элементов геологического строения дна залива ТОИ ДВО РАН, выполнены: детальное геомагнитное картирование акватории, островов и побережья залива Петра Великого М 1:5 000, 1:10 000, 1:25 000, 1:100 000; подробные геолого-геомагнитные исследования горных пород островов и берегового обрамления.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АКВАТОРИИ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Геомагнитные исследования залива Петра Великого для изучения геологического строения и особенностей тектоники Японского моря начаты в 1968 году Сахалинским комплексным НИИ СО АН СССР на НИС «Агат» (рис. 2, а) [9]. В 1971–1975 гг. геомагнитные съемки на акватории залива продолжены Ю.В. Шевалдиным на НИС «Первенец», «Агат». Они выполнялись для решения вопросов разломной тектоники и связанных с ней особенностей структуры поверхности фундамента залива (рис. 2, б) [25, 26]. В комплексе исследовательских работ Ю.В. Шевалдиным изучены магнитные свойства эффузивов, поднятых с поверхности дна залива Петра Великого [24]. В 1978 году для выяснения геологического строения фундамента шельфа и оценки глубин погружения его

кровли в сторону материкового склона А.А. Рязанцевым выполнена гидромагнитная съемка на севере и в центре акватории залива Петра Великого М 1: 200 000 (рис. 2, в)*. Для качественной интерпретации магнитных аномалий использованы результаты 396 измерений магнитной восприимчивости горных пород берегового обрамления и островов. По результатам работ описаны морфологические особенности АМП. Сделан вывод о связи положительных магнитных аномалий с мощными пластовыми сильно намагниченными телами субширотного простирания. Отмечена связь положительных магнитных аномалий с вулканитами среднего состава в южном замыкании островной гряды южнее о. Русский. Наиболее интенсивные положительные аномалии связаны автором с массивами габброидов. Предположено, что повышение значений

*Рязанцев А.А., Дуглас В.К. Геологическое строение и полезные ископаемые шельфа и побережья Японского моря в пределах залива Петра Великого от полуострова Дунай до бухты Нарва // Отчет Шельфовой партии за 1976–1978 гг. об опытно-производственной геологической съемке масштаба 1:200 000 шельфа и побережья Японского моря в пределах листов К-52-ХII, К-52-ХVIII, К-53-VI, К-53-ХIII. Т. II. ФГУ «Приморский территориальный фонд геологической информации» // Отчет Приморский ТГФ, 1978. С. 90.

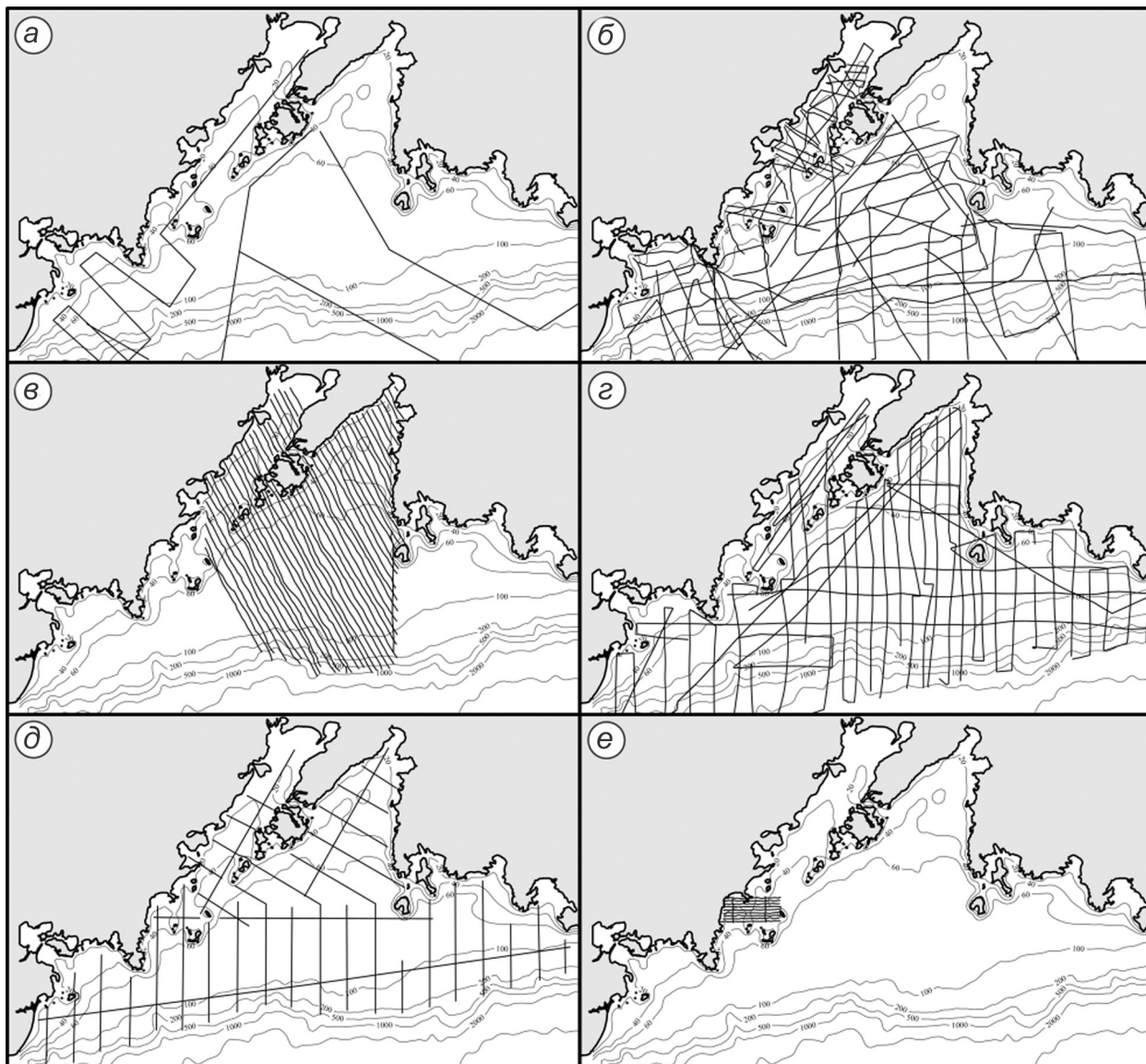


Рис. 2. Геомагнитные съемки на акватории залива Петра Великого.

a – 1968 г. [9], *б* – 1971–1975 гг. [26], *в* – 1978 г., *г* – 2003 г. ТОИ ДВО РАН, *д* – 2012 г. [5], *е* – 1989 г. [21]. Изолиниями показан рельеф дна, черными линиями – профили геомагнитных съемок.

магнитной восприимчивости магматических пород связано с процессами контактового метаморфизма.

В 1968–1978 гг. для географической привязки точек измерений геомагнитных съемок на акватории использовались судовые радиолокационные станции, береговые ориентиры и секстант, обеспечивавшие точность определения координат точек измерений 0.2–2.3 мили. Измерения геомагнитного поля выполнялись протонными магнитометрами МПМ-3, МПМ-4, квантовым магнитометром КМ-2М, несерийным оборудованием, точность измерения которого не превышала 2.5 нТл. Эти обстоятельства определили высокую погрешность измерений, использованных для

графической визуализации аномального магнитного поля. Выполненные исследования для своего времени были новаторскими и позволили получить первые представления о геологическом строении и тектонике дна акватории залива Петра Великого.

Современное измерительное и навигационное оборудование применялось для выполнения гидромагнитных съемок акватории залива Петра Великого ТОИ ДВО РАН на НИС «Профессор Гагаринский» в 2003 г. (рис. 2, *e*) и ВНИИ Океангеология в 2012 г. (рис. 2, *д*). По результатам исследований ТОИ ДВО РАН на НИС «Профессор Гагаринский» под руководством С.М. Николаева были получены данные,

удовлетворяющие требованиям построения карты масштаба 1:1 000 000. Результаты гидромагнитных исследований ВНИИ Океангеология М 1:1 000 000 были использованы авторами при уточнении сети разломов, ограничивающих крупные блоки земной коры [5].

Таким образом, на акватории залива Петра Великого среднemasштабные региональные геомагнитные исследования можно разделить по времени с перерывом в 25 лет 1968–1978 гг. и 2003–2012 гг. Эти исследования характеризовались одинаковыми целями. Использовались различные методические приемы, измерительное оборудование, навигационное обеспечение, определившие качество полученных материалов и интерпретации.

Особое место занимают детальные геомагнитные исследования на экспериментальном полигоне прибрежного участка залива Петра Великого площадью 8700 Га, выполненные в 1989 году ТОИ ДВО РАН с целью разработки методических приемов объемного геомагнитного картирования (рис. 2, е). В составе работ – многоуровневая площадная геомагнитная съемка М 1:25 000, 1:50 000 и 1:100 000 с использованием гидромагнитных и аэромагнитных измерений. Гидромагнитная съемка выполнена протонным магнитометром МБМ-1 на НИС «Квант». Высокая точность географической привязки достигнута за счет использования радиогеодезической системы АРГС, а также опытного образца спутниковой навигационной системы JLE-3200 и приёмника системы «ГЛОНАСС» [1, 21]. Интерпретация результатов экспериментальных работ выполнена на основе прямого сопоставления магнитных свойств выходящих на поверхность побережья геологических образований, вычислений аномальных эффектов, создаваемых ими, и интерполяции простираения геологических тел на акваторию.

Полуостров Муравьев-Амурский и частично о. Русский обследованы при выполнении аэромагнитной съемки в 1988 г.* К сожалению, использование этих материалов в открытой печати невозможно, вследствие их секретности.

Эффективность анализа и геологической интерпретации материалов геомагнитных исследований зависит от качества, полноты и детальности исходной информации. В 2005–2017 гг. на акватории и островах залива Петра Великого ТОИ ДВО РАН выполнен комплекс геомагнитных исследований, включавший геомагнитные съемки различных масштабов (рис. 3) и ге-

олого-геомагнитные исследования горных пород. Масштаб гидромагнитной съемки определялся глубиной моря: гидромагнитная съемка М 1:100 000, 1:50 000 при глубинах моря 30–90 м выполнена на НИС «Малахит», НИС «Импульс». На акватории залива Посыета, Гамовского каньона и северной части Амурского залива плотность съёмки была повышена до М 1:10 000. Для гидромагнитной съёмки М1:10 000 на мелководной акватории вблизи островов при глубине 1–30 м использована моторная лодка. На островах выполнена пешеходная геомагнитная съемка М 1:5 000.

Для измерений на глубоководной акватории применялись российские морские буксируемые протонные магнитометры МБМ-1, МРМГ-4. Измерения на мелководной акватории проводились с использованием автономного морского магнитометрического комплекса (АММК), разработанного в ТОИ ДВО РАН для измерения и регистрации модуля полного вектора геомагнитного поля в прибрежной зоне, где использование серийного магнитометрического оборудования с борта судов типа НИС «Малахит» невозможно по соображениям безопасности мореплавания. АММК собран на основе пешеходного протонного магнитометра ММП-203 и дополнен системой сбора и регистрации данных. Для определения местоположения судна во время проведения съемки и получения батиметрических данных использована навигационная система GPS GARMIN-420S. Повышение точности геомагнитных измерений на акватории и их географической привязки достигнуто за счёт использования разработанного в ТОИ ДВО РАН программного обеспечения, а также методических приёмов измерений и обработки данных. Магнитная съёмка на суше осуществлялась пешеходными протонными магнитометрами ММП-203, ММП-203МС. Для получения навигационных данных использован GPS приемник Garmin-60. Взаимоувязка данных морских и наземных измерений осуществлена экспериментально на акватории и побережье бухты Алексева (о. Попова) зимой в период ледостава.

Необходимость выявления геологической природы магнитных аномалий и выяснения характера геологических процессов, определивших образование объектов, обладающих аномальной намагниченностью, потребовала сбора материалов о геологическом строении и магнитных свойствах горных пород района исследований. Магнитные свойства горных пород района изучены вдоль профилей каппаметрии в береговых обнажениях и на водоразделах островов с шагом 1 м. На участках явно выраженных вторичных изменений горных пород, зон минерализации по трещинам и разломам проводились и более подробные

*Жуковская А.В., Лавник Е.К. и др. Результаты аэрогеофизических работ масштаба 1:25 000 на участке Муравьевском. (Отчет Аэрогеофизической партии за 1987-89 г.г.) // Отчет. Приморское производственное геологическое объединение. ФГУ «Приморский территориальный фонд геологической информации». 1989.

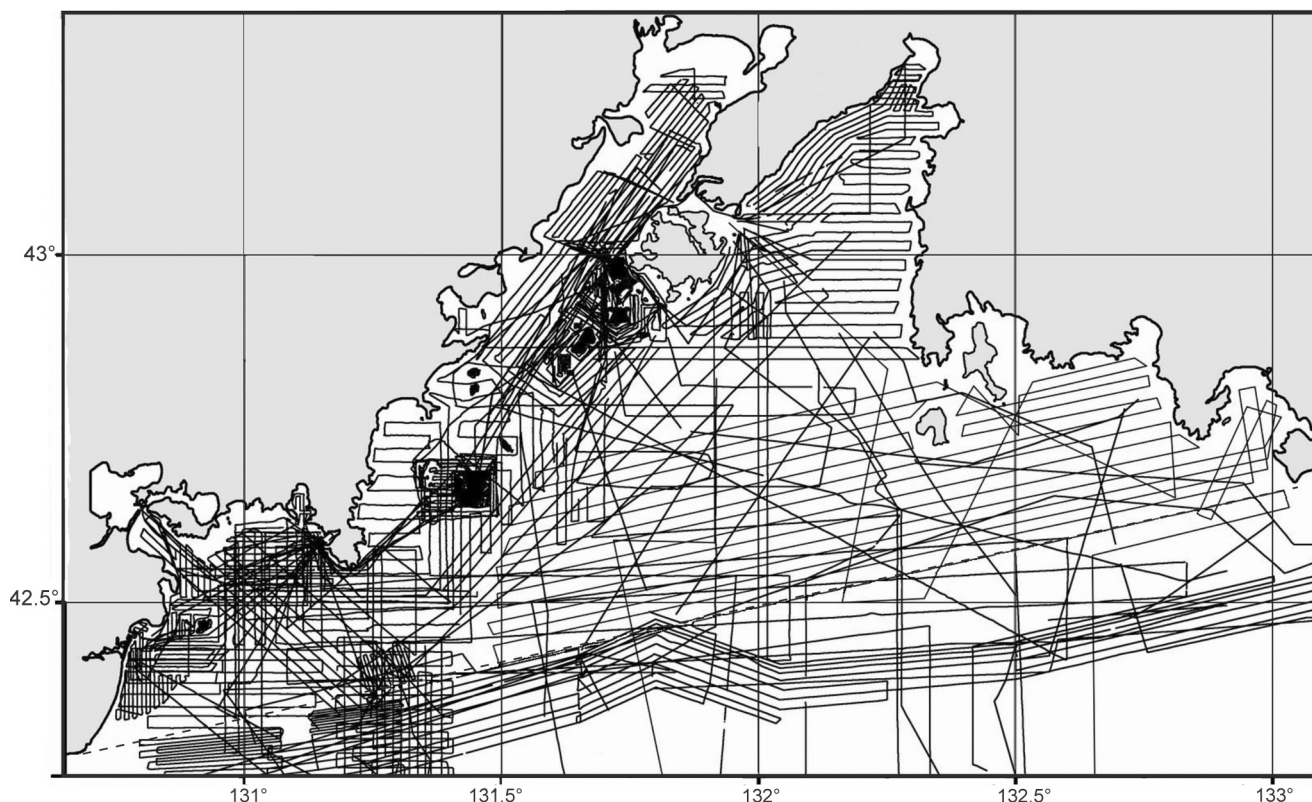


Рис. 3. Геомагнитные съемки на акватории и островах залива Петра Великого, выполненные ТОИ ДВО РАН в 2005–2017 гг.

Линиями показаны профили геомагнитных измерений.

измерения. Общее количество пунктов измерений составило 16 534. Выполнены отбор образцов горных пород, петрографическое описание и выборочные лабораторные измерения намагниченности. Плотность пунктов опробования определялась необходимостью прямого сопоставления выделенных на картах АМП островов М 1:5 000 магнитных аномалий и особенностей геологического строения.

АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

По результатам увязки геомагнитных измерений на акватории залива Петра Великого и островах составлена цифровая модель аномального магнитного поля, представленная в виде карты-схемы (рис. 4). На участке островной гряды в центре залива для устранения искажений, связанных с неровностями рельефа, введены поправки.

Аномальное магнитное поле залива Петра Великого знакопеременное и характеризуется значениями $-2000 \div 5500$ нТл. Положительные магнитные аномалии занимают значительные площади и имеют выраженные границы. Особенностью АМП залива явля-

ется наличие высокоинтенсивных локальных магнитных аномалий в форме диполей.

Геомагнитное районирование залива Петра Великого, выполненное на основании крупномасштабных геомагнитных съемок, с учетом особенностей морфологии АМП выглядит следующим образом (рис. 5):

I тип – слабоградиентные низкоамплитудные отрицательные магнитные аномалии, занимающие значительную площадь;

II тип – низкоамплитудные, низкоградиентные локальные положительные аномалии без выраженного максимума;

III тип – знакопеременные (с преобладанием положительных) магнитные аномалии сложной мозаичной структуры;

IV тип – занимающие значительные площади положительные магнитные аномалии, осложненные локальными высокоинтенсивными, высокоградиентными участками (до 500 нТл) округлой формы;

V тип – высокоамплитудные, высокоградиентные локальные магнитные аномалии в форме диполей с максимумом на юге и минимумом на севере.

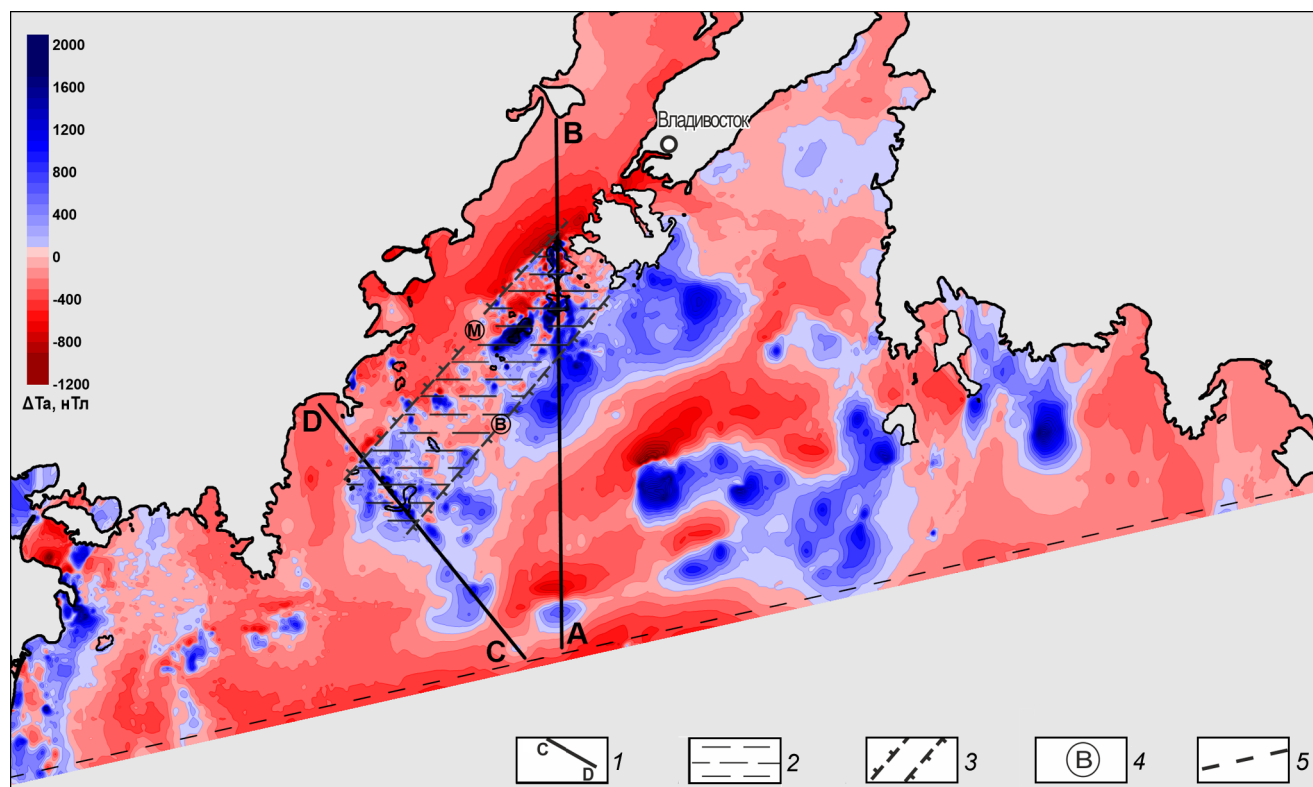


Рис. 4. Аномальное магнитное поле залива Петра Великого с элементами интерпретации.

1 – положение в плане профилей количественной интерпретации; 2 – Муравьевский горст-антиклинорий; 3 – тектонические границы; 4 – Муравьевский (Береговой) разлом (М), Восточный разлом (В); 5 – внешняя граница залива Петра Великого.

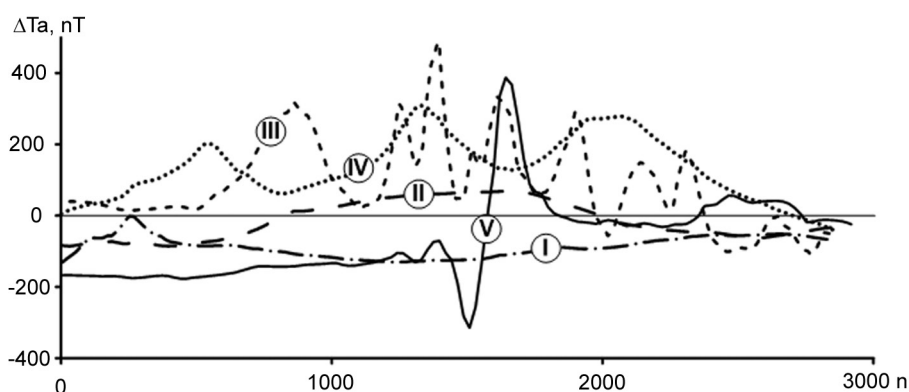


Рис. 5. Типы магнитных аномалий залива Петра Великого.

Аномалии I–IV типов в центральной части залива Петра Великого характеризуются границами диагонального простирания, а на западе и востоке простирание таких аномалий субмеридиональное. Низкоамплитудными сглаженными отрицательными аномалиями I типа характеризуется акватория на севере, западе и востоке залива Петра Великого. Положительные магнитные аномалии II-го типа выделены в его восточной части.

Депрессия Амурского залива характеризуется самой большой по площади отрицательной магнитной аномалией I типа, особенностью которой является постепенное повышение амплитуды в северо-западном направлении. Во впадине под рыхлыми отложениями голоцена и верхнего плейстоцена [16] залегает толща кайнозойских образований мощностью более 2.5 км [8]. На юго-востоке залива резкое снижение амплитуды определяется зоной контакта

геологических структур Амурского залива и Муравьевского горст-антиклинория. Магнитная аномалия I типа занимает значительную площадь на севере Уссурийского залива, впадина которого заполнена мощной толщей четвертичных отложений [15, 17]. В южном замыкании эта аномалия характеризуется линейной границей СЗ – ЮВ простирания, а в центре осложнена положительной аномалией II-го типа. Положительная аномалия пространственно сопряжена с выступом кровли акустического фундамента, выделенного по данным НСП [18].

Отрицательные аномалии I типа выделены в северо-восточном замыкании залива Петра Великого, вблизи полуострова Гамова и к югу от него. Характерной особенностью этих аномалий является выраженное субмеридиональное простирание и сопряженность с гранитными массивами прилегающего побережья. Аномалии II-го типа выделены в северной части залива Посыета и северо-западнее о. Аскольд. Они характеризуются изометричной формой, занимают небольшие площади и пространственно сопряжены с отрицательными аномалиями I-го типа. Магнитные аномалии III типа занимают значительную площадь к юго-западу от о. Русский, а также в юго-западном замыкании залива Петра Великого. Положительные аномалии IV-го типа охватывают большое пространство в центре и на востоке залива Петра Великого.

Локальные магнитные аномалии V-го типа выделены на севере острова Попова, в районе банки Зубр, вблизи п-ва Сулова и в заливе Рейд Паллада, на юге Уссурийского залива. В юго-западной части залива Петра Великого такие аномалии расположены группой линейного субширотного простирания.

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Поскольку статистически значимое различие петромагнитных параметров геологических тел является обязательным условием возникновения геомагнитных аномалий, решена самостоятельная методическая задача – выделение петромагнитных комплексов пород островов, расположенных в центральной части залива Петра Великого. Петромагнитные исследования выполнялись на островах южнее о. Русский и островах архипелага Римского-Корсакова.

Островная гряда, являющаяся морфологическим продолжением полуострова Муравьев-Амурский, разделяет северную часть залива Петра Великого на Амурский и Уссурийский заливы (рис. 1). Южнее о. Русский расположены 22 острова, наиболее крупные из них о-ва Попова, Рейнеке и Рикорда. Острова сложены преимущественно позднепалеозойскими,

мезозойскими интрузивными и вулканическими породами различного состава, характерными для Муравьевской складчатой системы [6].

Архипелаг Римского-Корсакова, расположенный в центральной части залива Петра Великого, состоит из пяти островов: о. Большой Пелис, о. Гильдебрандта, о. Де-Ливрона, о. Дурново и о. Матвеева, продолжением которого является каменная гряда. Острова архипелага характеризуются сложным геологическим строением: выделены комплексы осадочных пород, вулканические и интрузивные породы различного состава, сформировавшиеся в результате многофазных геологических процессов, происходивших с начала позднего палеозоя [7, 22]. По мнению С.А. Коренбаума [22], на этих островах обнажаются фрагменты обособленной верхнепалеозойской осадочной толщи, стратиграфический разрез которой включает не менее трех циклов осадконакопления, что заметно отличает ее от палеозойских толщ островной гряды, расположенной севернее.

Магматические образования позднего палеозоя на островах Попова, Рикорда, Рейнеке и островах архипелага Римского-Корсакова образуют достаточно сложные комплексы. Но эти комплексы на севере и на юге отличаются как по особенностям химического состава исходных расплавов, так и по условиям становления интрузивных тел. Отсутствие палеонтологической характеристики возраста осадочных толщ не позволяет оценить и время окончания магматических процессов. Скорее всего, наиболее поздние проявления магматизма, начинавшегося в палеозойское время, завершались уже в мезозое. Исследования С.А. Коренбаума [22] и О.Л. Смирновой [20] позволяют сделать вывод о существовании на архипелаге Римского-Корсакова магматических пород мезозойского возраста. Это преимущественно малоглубинные тела гранитоидов, последовательность внедрения которых не укладывается в единый магматический цикл. С.А. Коренбаум относит дайки основного состава архипелага Римского-Корсакова, которые прорывают штокообразные тела мезозойских гранитоидов и толщи осадочных пород, к позднему мезозою.

Есть основания полагать, что мезозойский магматизм северных островов (о-ва Попова, Рикорда, Рейнеке и др.) существенно отличался от такового на островах архипелага Римского-Корсакова.

Многообразие разновидностей и типов магматических пород, имеющих сложные пространственно-структурные связи, широко развитые проявления гидротермальных и метасоматических изменений свидетельствуют о существовании длительно живущего центра эндогенной тектономагматической активности

[4]. Геологическая среда островов характеризуется высокой степенью дислоцированности и широко проявленными вторичными изменениями материнских пород изохимического и гидротермального характера. К ним относятся процессы ороговикования с развитием скоплений роговикового биотита, амфиболизация, хлоритизация, сульфидная минерализация и др. Наибольшая степень вторичных изменений характерна для пород в зонах тектонических нарушений. В протяженных трещинах мощностью 1–10 см выявлена жильная магнетитовая минерализация [2]. Наблюдаемая сопряженность на островах интрузивных и вулканических проявлений как кислого, так и основного состава, возможно, свидетельствует о пространственной сопряженности очагов и каналов поступления основной и кислой магм.

Главным критерием измерений магнитной восприимчивости в естественном залегании являлось такое суммарное количество замеров, которое достаточно для статистически представительного анализа петромагнитных особенностей конкретных геологических образований, объединенных в группу, характеризующуюся определенным вещественным составом, возрастом, генетическим типом, характером и степенью вторичных изменений и т. п. Как показала практика исследований на островах залива Петра Великого, для статистически достоверной характеристики однородной петромагнитной группы необходимо выполнить не менее 180 измерений. На основании полученных вариационных рядов построены гistogramмы, использованные в дальнейшем для выделения петромагнитных комплексов.

Петромагнитная систематизация реализована с учетом пространственного положения островов, геологического строения и возраста горных пород. Выделение петромагнитных комплексов островов северо-западной части залива Петра Великого и архипелага Римского-Корсакова выполнено независимо. В качестве значимых характеристик использованы максимальные, минимальные значения магнитной восприимчивости петромагнитных групп, а также средние значения модальных интервалов гistogramм распределения исследуемого параметра. Критериями выделения являются существенные различия этих характеристик у различных комплексов и выдержанность в пределах комплекса.

Осадочные породы островов обладают очень низкими значениями исследуемого параметра ($0.01–2.5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ). Эти геологические образования не рассматривались при выделении петромагнитных комплексов.

По результатам измерений магнитной восприимчивости горных пород островов Попова, Рикорда,

Рейнеке выделены 58 петромагнитных групп, объединенных в 6 петромагнитных комплексов от менее к более магнитным (рис. 6).

Первый петромагнитный комплекс объединяет разные типы слабомагнитных магматических пород. Это вулканы кислого, среднего и основного состава, порфириовидные граниты, мелкозернистые габброиды, подвергшиеся процессу ороговикования под воздействием гранитных интрузий. Ширина диапазона магнитной восприимчивости $(0.03–2.62) \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Второй петромагнитный комплекс включает только гранитоиды седанкинского комплекса и характеризуется магнитной восприимчивостью от $0.1 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ до $11.7 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Выделение этих пород в отдельную группу определяется тем, что максимальное и среднее значения исследуемого параметра на порядок выше, чем в горных породах первого петромагнитного комплекса. Третий петромагнитный комплекс объединяет интрузивные образования кислого и основного состава, вулканы среднего и основного состава. Эти породы в среднем намагничиваются в два раза интенсивнее, чем породы второго петромагнитного комплекса ($\alpha_{\min} = 0.17 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\alpha_{\max} = 26.2 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ). В четвертый, наиболее представительный петромагнитный комплекс с $\alpha_{\min} = 0.32 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\alpha_{\max} = 47.2 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ включены кислые, средние и основные интрузивные породы и вулканы основного и среднего состава. В пятый петромагнитный комплекс ($\alpha_{\min} = 1.8 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\alpha_{\max} = 61.4 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\alpha_{\text{cp}} = 33.77 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ) комплекс вошли лейкократовое амфиболитизированное и мелкозернистое меланократовое габбро, а также габбродолериты и андезибазальты. Наиболее магнитными являются меланократовые габброиды муравьевского комплекса ($\alpha_{\min} = 7.33 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\alpha_{\max} = 184 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ).

Максимальные значения магнитной восприимчивости габбро связаны с зонами развития жильного магнетита гидротермального генезиса, который установлен в бухте Алексеева и на южном склоне бухты Западной (о. Попова), а также в северной части о. Рикорда, они составляют $372 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ (о. Попова), $436 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ (о. Рикорда). Мощность магнетитовых жил достигает 15–20 сантиметров. В центральной части о. Рикорда, отмечены аномально высокие значения исследуемого параметра в дацитах (α до $320 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ). На участках измерений в зоне гидротермальных изменений визуально выявлены гнезда магнетита размером 5–15 см. В шестой петромагнитный комплекс выделены именно эти типы пород.

На островах архипелага Римского-Корсакова установлены 25 петромагнитных групп, которые были объединены в 6 петромагнитных комплексов (рис. 7).

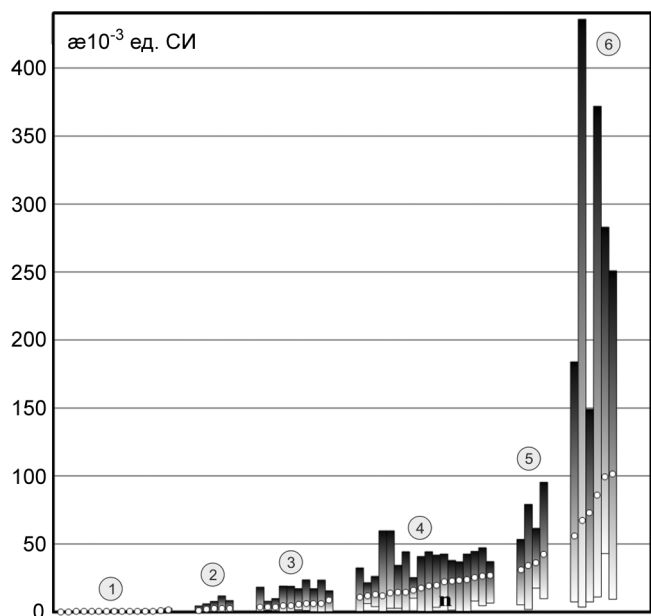


Рис. 6. Петромагнитные комплексы островов Попова, Рикорда, Рейнеке.

Белыми точками показаны средние значения магнитной восприимчивости петромагнитных групп.

Седьмой петромагнитный комплекс представлен слабомагнитными горными породами: вулканитами кислого, среднего и основного состава, а также породами осадочной толщи. Диапазон значений χ $(0.1-3.84) \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Восьмой петромагнитный комплекс включает относительно слабомагнитные габбродолериты, андезиты и граниты, характеризующиеся магнитной восприимчивостью от $0.03 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ до $13.075 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Выделение этих пород в отдельную группу определяется тем, что максимальное и среднее значения исследуемого параметра на порядок выше, чем у горных пород седьмого петромагнитного комплекса. В девятый петромагнитный комплекс объединены интрузивные образования кислого состава. Эти породы в среднем намагничиваются в два раза интенсивнее, чем породы восьмого петромагнитного комплекса: $\chi_{\min} - 2.06 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\chi_{\max} - 17.9 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Десятый петромагнитный комплекс с $\chi_{\min} - 0.53 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\chi_{\max} - 46.6 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ включает кислые и основные интрузивные породы, а также вулканиты среднего и основного состава. Одиннадцатый петромагнитный комплекс объединяет интенсивно магнитные вулканические и интрузивные породы только основного состава: $\chi_{\min} - 0.79 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\chi_{\max} - 72 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ.

Наиболее магнитным является двенадцатый комплекс, представленный габбродолеритами и базальтами в зоне мощнейшей гидротермальной проработки,

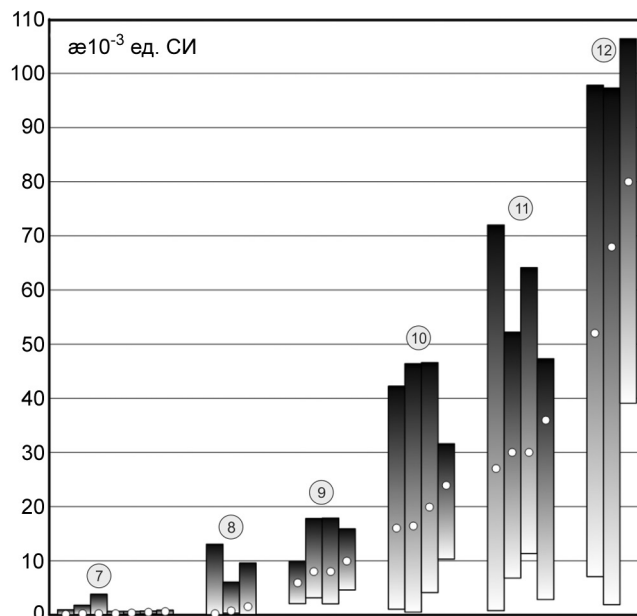


Рис. 7. Петромагнитные комплексы архипелага Римско-Корсакова.

Белыми точками показаны средние значения магнитной восприимчивости петромагнитных групп.

отличительной особенностью которой является широкое развитие гнездово-жильной магнетитовой минерализации. Подобные результаты получены при изучении петромагнитных характеристик горных пород островов Попова и Рикорда.

Широко развитые на островах залива Петра Великого магматические породы основного состава, как вулканические, так и интрузивные, характеризуются не только наиболее высокими значениями, но и выраженной неоднородностью магнитной восприимчивости. В береговом обнажении габбро на севере о. Попова отмечено скачкообразное изменение значения исследуемого параметра на порядок [2]. Такая же особенность выявлена в массиве габбро на северном побережье о. Рикорда и в базальтах северного побережья о. Матвеева.

Неравномерное распределение магнетита в габброидах и базальтах определяется окислительно-восстановительными условиями. Участки с максимальной намагниченностью характеризуются развитием гнездово- и жилообразного магнетита, формирование которого происходило как в стадию кристаллизации магматического расплава, так и под воздействием последующих гидротермально-метасоматических преобразований. Исследования А.П. Лихачева [13] показали, что магнетитообразование в обоих случаях происходит в окислительных условиях при поступлении свободного кислорода, поставляемого поверхностны-

ми (метеорными) водами. В магматическую стадию формирования магнетита осуществляется за счет фаялитовой и ферросилитовой составляющей расплава, а в постмагматическую – из ферросиликатов, преимущественно расплавленных сквозьмагматическими растворами. В первом случае магнетит выдавливается в прожилки и просечки тектоническими процессами, во втором – выносится гидротермальными растворами. Как правило, с зонами интенсивной намагниченности не связаны проявления или месторождения сульфидов (в том числе и сульфидов железа), золота, алмазов, нефти, газа и др. Перспективными на эти типы минерализации могут быть слабонамагниченные вулканиты и интрузивы. Выходы таких пород установлены в пределах исследуемых островов. Согласно точке зрения того же автора [12, 13], уменьшение намагниченности характерно для вторичных изменений, возникших в восстановительных условиях. Смена окислительных условий на восстановительные происходит в результате того, что метеорные воды, несущие свободный кислород, в конечном счете, его утрачивают. Бескислородный глубинный флюид, поднимаясь вверх, способствует высвобождению цветных и других металлов из вмещающих пород и их подъему к поверхности.

Таким образом, гидротермально измененные породы шестого и двенадцатого петромагнитных комплексов приурочены к зонам растяжения с возможностью проникновения в них атмосферного кислорода, способствующего возникновению окислительных условий, благоприятных для формирования магнетита – главного источника магнитных аномалий. Аномально низкие значения магнитной восприимчивости дифференциатов базитовых магм первого, седьмого и восьмого петромагнитных комплексов, скорее всего, являются результатом вторичных изменений пород, возникших в восстановительных условиях зоны сжатия.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМП

Результаты детальных геомагнитных исследований акватории и островов залива Петра Великого позволили выполнить количественную интерпретацию АМП и сформировать геомагнитную модель геологической среды, существенно отличающуюся от известных* [3, 26]. Для восстановления параметров геомагнитных разрезов использовано программное

обеспечение ZondMAG2d. Геомагнитная среда представлена в виде регулярной сети ячеек, которым присваиваются дискретные значения магнитной восприимчивости. При расчетах учитывается азимут профиля, склонение и наклонение полного вектора геомагнитного поля. При вычислениях сделано допущение о коллинеарности вектора намагниченности модельных тел и направления вектора магнитной индукции в настоящее время. Значения коэффициента Кёнигсберге-ра интрузивных образований основного состава, исследованных на островах Попова, Рейнеке, Рикорда, островах архипелага Римского-Корсакова, около 1 [2].

На рисунке 8 показаны результаты геомагнитного моделирования по профилю АВ, проложенному вдоль меридиана и пересекающему острова Рейнеке и Попова (рис. 4), а также по профилю СD диагонального простирания, пересекающему архипелаг Римского-Корсакова.

Источником магнитной аномалии V типа в южной части профиля АВ является близповерхностный локальный столбобразный объект, не ограниченный по глубине в рамках заданного разреза (рис. 8). Характерной особенностью аномалообразующего тела является постепенное латеральное снижение намагниченности и резкое снижение намагниченности на глубине 1000 м. Максимальная намагниченность соответствует намагниченности интрузивных пород кислого состава и вулканитов среднего состава четвертого петромагнитного комплекса, а также интрузивных пород кислого состава и вулканитов основного состава десятого петромагнитного комплекса. Аномалия III типа соответствует положению в плане островной гряды и обрамляющей её акватории в центре залива Петра Великого. На модельном разрезе АВ петромагнитная среда – источник этой аномалии – проинтерпретирована неоднородно намагниченным массивом, состоящим из вертикальных блоков сопоставимого размера. Магнитные свойства блоков соответствуют 1–6 петромагнитным комплексам. Максимально намагниченные локальные участки приурочены к верхней части разреза. Нижняя кромка аномально намагниченных тел расположена в основном на глубинах 600–1100 м. Ниже, на глубинах 1300–2000 м выделены крупные блоки с аномальной намагниченностью, характерной для 5 и 6-го петромагнитных комплексов, представленных интрузивными и вулканическими разновидностями базитовых

*Рязанцев А.А., Дуглас В.К. Геологическое строение и полезные ископаемые шельфа и побережья Японского моря в пределах залива Петра Великого от полуострова Дунай до бухты Нарва // Отчет Шельфовой партии за 1976–1978 гг. об опытно-производственной геологической съемке масштаба 1:200 000 шельфа и побережья Японского моря в пределах листов К-52-ХII, К-52-ХVIII, К-53-VII, К-53-ХIII. Том. II. ФГУ «Приморский территориальный фонд геологической информации» // Отчет Приморский ТГФ, 1978. С. 90.

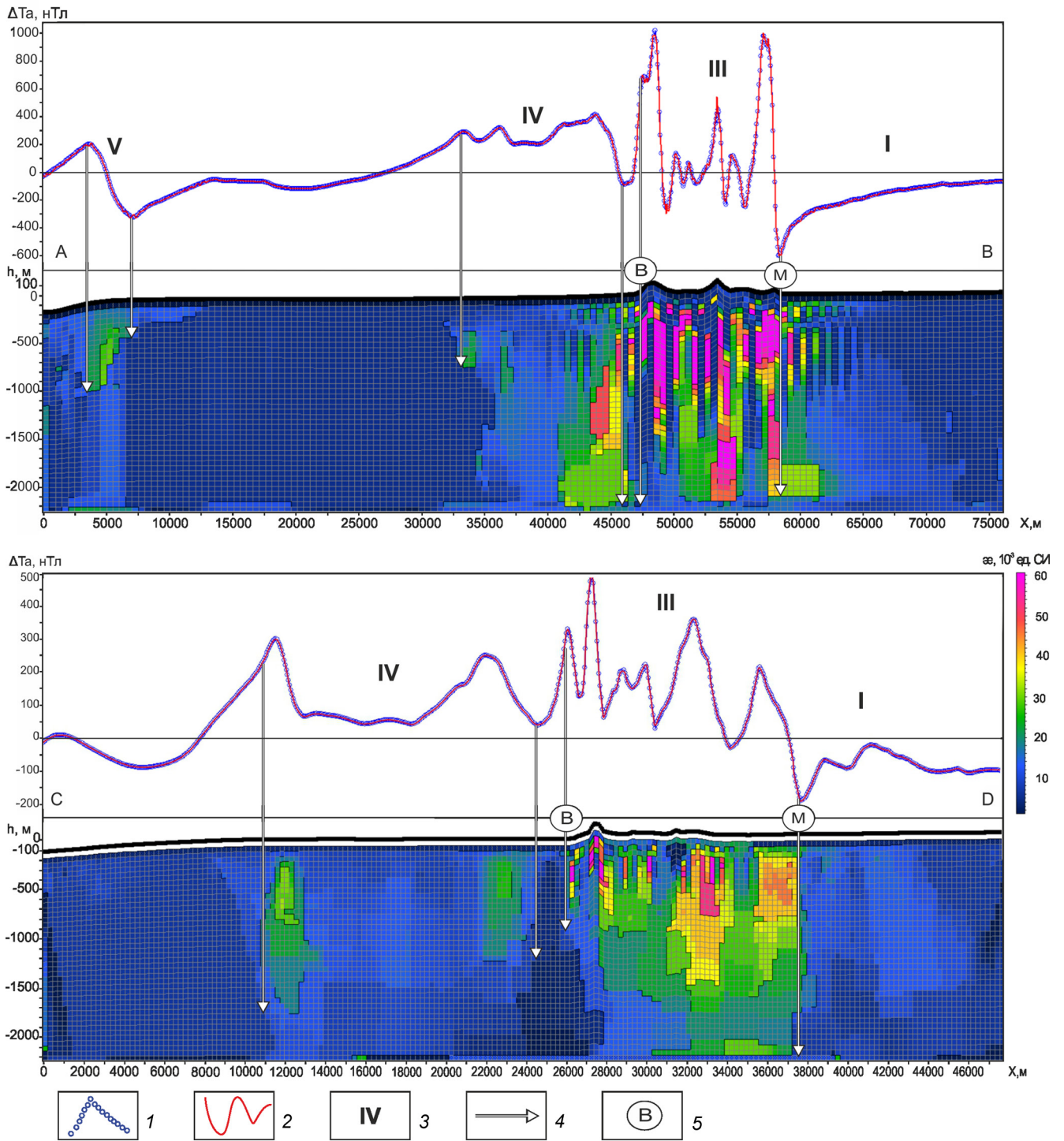


Рис. 8. Количественная интерпретация АМП залива Петра Великого.

1 – anomalous magnetic field; 2 – selected field; 3 – type of magnetic anomaly; 4 – boundaries of anomaly-forming objects; 5 – position in the plan of projections of the planes of dislocations of the Muraviev horst-anticline: M – Muraviev (Beregovoy) dislocation, B – Eastern dislocation.

магм и их гидротермально измененными аналогами. Петромагнитная среда в верхней части разреза на севере профиля (аномалия I типа) характеризуется низкой намагниченностью, свойственной осадочным породам. В основании разреза на северном участке вблизи о. Попова на глубине 1800 м выделено модельное тело, магнитные свойства которого соответствуют 4–5 петромагнитным комплексам. Этот объект, с большой долей вероятности, представляет собой поверхность грабена Амурского залива, сопряженного с левым крылом Муравьевского горст-антиклинория. Источником положительной аномалии IV типа, расположенной южнее острова Рейнеке, является неоднородно намагниченное интрузивное тело, верхняя кромка которого расположена на глубине 400 м. На модельном разрезе показано ступенчатое погружение верхней кромки аномалообразующего объекта до глубины 1100 м. Эта глубина согласуется с количественными определениями амплитуды Муравьевского горста в континентальной части [19]. Максимальная намагниченность аномалообразующего тела, выделенная в интервале глубин 400–1500 м, сопоставима с магнитными свойствами габбро, габбродолеритов и андезибазальтов пятого петромагнитного комплекса.

Магнитная аномалия III типа, выделенная на профиле CD в районе архипелага Римского-Корсакова, отражает влияние неравномерно распределенных магнитных масс (рис. 8). Прослеживается чередование слабо и сильномагнитных субвертикальных штокообразных блоков по горизонтали. Нижняя кромка аномально намагниченных участков, расположенных в верхней части разреза и соответствующих габбродолеритам и базальтам зоны гидротермальной проработки (двенадцатый петромагнитный комплекс), не опускается ниже 800 м. В основании разреза намагниченность аномалообразующего объекта неоднородна и характеризуется плавным уменьшением с глубиной. Источники аномалий IV типа в южной части профиля расположены вблизи поверхности дна и ограничены по глубине. В центре аномалии по магнитным свойствам породы могут быть отнесены девятому и десятому петромагнитным комплексам, а в краевых частях аномалии – к одиннадцатому, включающему интрузивные и вулканические породы различного состава. Геомагнитная среда южнее и севернее архипелага Римского-Корсакова характеризуется слабой дифференцированностью магнитных свойств и представлена, скорее всего, магматическими породами восьмого и девятого петромагнитных комплексов – андезитами, гранитами и относительно слабомагнитными габбродолеритами.

По результатам геомагнитного моделирования, типизации магнитных аномалий и петромагнитной

классификации горных пород залива Петра Великого можно обоснованно предположить вещественный состав источников магнитных аномалий. Источниками магнитных аномалий I типа являются мощные толщи осадочных пород. Интрузивные тела кислого состава представляют собой близповерхностно расположенные аномалообразующие объекты, создающие аномалии II типа (2-й и 9-й петромагнитные комплексы). Источниками магнитных аномалий IV типа могут быть глубокозалегающие геологические тела, в составе которых дифференциаты базитовых магм, габбродолериты и андезибазальты (5-й и 11-й петромагнитные комплексы). Магнитные аномалии V типа связаны с расположенными вблизи поверхности, ограниченными по глубине интрузивами различного состава, вулканитами среднего и основного состава (4-й, 10-й петромагнитные комплексы). Аномалии III типа отражают влияние магнитных масс обособленных вертикальных, неоднородно намагниченных массивов горных пород с выраженными границами, состоящих из вертикальных блоков сопоставимого размера. Отдельные блоки также имеют четко выраженные субвертикальные границы, которые прослеживаются до глубины 700 метров и более. Наиболее магнитные блоки соответствуют гидротермально измененным вулканитам и интрузивам основного состава (6-й, 12-й петромагнитные комплексы). Следовательно, источник магнитной аномалии III типа в центральной части залива Петра Великого представляет собой поднятие тектонического происхождения, которое отличается высокой степенью дислоцированности и является зоной мощнейшей гидротермальной проработки. Простираение внутренних дислокаций выдержано по глубине и может превышать 2 км. Детальные геолого-геоморфологические исследования, выполненные А.А. Гавриловым на островах Попова, Рикорда, Рейнеке, позволили автору сделать выводы о высокой плотности тектонической трещиноватости [4]. Эти разрывные нарушения являлись подводными каналами, по которым в разное время и на разные глубины происходило внедрение как крупных интрузий, так и мелких штоко- и дайкообразных тел и покровов, главным образом, основного состава (габбро, габбродолериты, базальты, андезибазальты и андезиты). За магматическим этапом следовали сначала изохимические процессы (ороговикование пород), а затем гидротермальные. Со всеми этими процессами, начиная с магматического, связано формирование магнетита – главного источника магнитных аномалий.

Таким образом, с учетом результатов геомагнитного моделирования в центральной части залива Петра Великого выделено точное положение субвертикальных параллельных линейных границ диагональ-

ного простираения, характеризующихся резкой сменой типов аномалий магнитного поля и значительными изменениями глубины залегания, структуры и состава источников магнитных аномалий. Эти границы являются бортами Муравьевского горста на акватории залива Петра Великого. Амплитуда вертикальных смещений правого борта на широте о. Попова составляет 400 м и более, а левого борта превышает 1500 м. Вычисленная ширина горста составляет 10–12 км. Северо-западный (левый) борт совпадает с положением в плане Муравьевского (Берегового) разлома (рис. 4), выделенного ранее Р.Г. Кулиничем по простираению интенсивной гравитационной ступени [10, 11]. Позднее разлом классифицирован как левосторонний сдвиг ССВ простираения и отнесен к мезозойскому этапу деформаций земной коры [23]. Точное местоположение юго-восточной границы Муравьевского горст-антиклинория, простирающейся от о. Шкота до юго-восточного мыса о. Большой Пелис, определено впервые на основе детальных геомагнитных исследований. Эта граница представляет собой разлом вдоль правого борта Муравьевского горст-антиклинория на акватории залива Петра Великого. Для унификации названий геоструктурных элементов можно предложить в дальнейшем называть её Восточный разлом (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение детальности геомагнитных исследований залива Петра Великого позволяет по-новому взглянуть на природу магнитных аномалий, обоснованно подойти к решению вопроса структурно-тектонического районирования его центральной части. В АМП уверенно выделяются тектонические границы Муравьевского горст-антиклинория. На северо-востоке Муравьевский (береговой) разлом, прослеживается по смене магнитной аномалии III типа на аномалию I типа, а на юго-востоке Восточный разлом выделен по смене аномалии III типа на аномалию IV типа.

Неоднородность намагниченности блоков горных пород Муравьевского горст-антиклинория может определяться неоднократной сменой геодинамических условий. Аномальная высокая намагниченность гидротермально измененных дифференциатов базитовых магм сформирована в условиях растяжения. Аномально низкая намагниченность метаморфизованных габброидов и базальтов характерна для зон сжатия (или слабого растяжения).

Новые сведения о морфологии, глубинах залегания и вещественном составе источников магнитных аномалий существенным образом меняют сложившиеся представления о структурных неоднородностях геологической среды залива Петра Великого. Они мо-

гут быть использованы для детализации и коррекции известных структурно-тектонических схем, оптимизации решения научных и практических задач, в том числе актуальных задач сеймотектонического районирования. Приведенная классификация магнитных аномалий позволит разработать критерии выделения зон повышенной проницаемости фундамента на прилегающей суше.

Исследования выполнены по теме гос. задания ТОИ ДВО РАН АААА-А17-117030110033-0.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность к.г.-м.н. В.Т. Съедину за полевые определения типов горных пород, Н.М. Цовбуну и А.С. Жуковину за помощь при подготовке измерительного оборудования и участие в полевых измерениях. К сожалению, уже невозможно непосредственно поблагодарить В.М. Никифорова, оказавшего огромную поддержку на всех этапах исследований залива Петра Великого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабашин, В.И., Ефимов А.Б., Коптев А.А., Чуков И.Д. Информационно-измерительная система прибрежного геополгона // Геофиз. исслед. Тихоокеан. региона. Владивосток: Дальнаука, 1993. С. 107–116.
2. Бессонова Е.А., Никифоров В.М., Залищак В.Б., Зверев С.А., Емельянова Т.А. Природа магнитных аномалий островов Попова, Рикорда, Рейнеке (залива Петра Великого, Японское море) по результатам детальных исследований // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 340–355.
3. Бессонова Е.А., Никифоров В.М., Зверев С.А., Коптев А.А., Залищак В.Б. Аномальное магнитное поле северо-западной части залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 213–220.
4. Гаврилов А.А. Острова залива Петра Великого – важные структурные элементы Южно-Приморского участка зоны сочленения Евразийского континента и впадины Японского моря // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 312–339.
5. Государственный мониторинг состояния недр прибрежно-шельфовой зоны залива Петра Великого в связи с интенсивным хозяйственным освоением территории. Государственный контракт № 30/07/60-13 от 16 апреля 2012 г // Информ. бюлл. № 1. ФГУП ВНИИ Океангеология им. И.С. Грамберга. СПб., 2012. 113 с.
6. Изосов Л.А., Съедин В.Т., Емельянова Т.А., Крамчанин К.Ю., Смирнова О.Л., Огородный А.А., Ли Н.С. Новые данные по геологии островов залива Петра Великого (Японское море). Остров Попова // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 2. С. 13–21.
7. Изосов Л.А., Бессонова Е.А., Крамчанин К.Ю., Огородный А.А., Ли Н.С. Геолого-формационные исследования залива Петра Великого (1995–2015 гг.) // Вестн. ДВО РАН. 2018. № 4. С. 143–153.

8. Карнаух В.Н., Суховеев Е.Н., Листровая И.А. Высокорастворимые сейсмоакустические исследования скоплений газа в голоценовых донных отложениях Амурского залива (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3. С. 56–64.
9. Красный М.Л. Региональные особенности аномального магнитного поля Японского моря (по гидромагнитным исследованиям) // Тр. СахКНИИ. 1969. Вып. 20. С. 227–234.
10. Кулинич Р.Г. Особенности геологического строения Приморского края по геолого-геофизическим данным: дис. ... канд. геол.-минер. наук. АН СССР. Сиб. отд-ние. Дальневост. фил. им. В. Л. Комарова. Владивосток, 1969. 400 с.
11. 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. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 134–144.
12. Лихачев А.П. Причины и условия существования магнитных и немагнитных полей земной коры, определяющих формирование и размещение месторождений золота, алмазов, нефти, газа и других полезных ископаемых // Отеч. геология. 2013. № 6. С. 40–50.
13. Лихачев А.П. Условия образования магнетита и его рудных скоплений // Отеч. геология. 2017. № 4. С. 44–53
14. Лоция Северо-Западного берега Японского моря – от реки Туманная до мыса Белкина. № 1401. СПб.: ГУНиО МО РФ, 1996. 360 с.
15. Марков Ю.Д., Кузнецов В.В., Радкевич Р.О. Интерпретация данных непрерывного сейсмоакустического профилирования в Уссурийском заливе // Геология дна окраинных морей Тихого океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 115–121.
16. Марков Ю.Д. Четвертичные отложения шельфа в пределах залива Петра Великого (Японское море) // Палеонтология и стратиграфия кайнозойских отложений Японского и Филиппинского морей. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 21–44.
17. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. Новые данные по стратиграфии четвертичных отложений Амурского залива (Приморский край) // Естеств. и техн. науки. 2011. № 3. С. 242–245.
18. Прокудин В.Г., Филатьев В.П. Особенности временных разрезов НСП в заливе Петра Великого // Геофизические исследования переходной зоны от континента к океану в области Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 66–76.
19. Олейников А.В., Олейников Н.А. Геологические признаки сейсмичности и палеосейсмогеологии Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2001. 185 с.
20. Смирнова О.Л., Бессонова Е.А., Емельянова Т.А. Мезозойские радиоларии из ритмично-слоистых отложений островов архипелага Римского-Корсакова (залив Петра Великого, Японское море) и их значение для определения границы триаса и юры // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 2. С. 39–54
21. 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.
22. Сясько А.А., Вржосек А.А., Дубинский А.П., Кононец С.Н., Короткий А.М., Кутуб-Заде Т.К., Лях И.И., Неволин П.Л., Попов В.К., Родионов А.Н., Углов В.В., Уткин В.П., Шлыков С.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000. Серия Сихотэ-Алинская. Листы К-52-ХП, ХVIII: Объясн. зап. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016. 241 с.
23. Уткин В.П., Неволин П.Л., Митрохин А.Н. Позднепалеозойский и мезозойский планы деформаций юго-западного Приморья // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 3–21.
24. Шевалдин Ю.В., Назарова Е.А. О магнитных свойствах изверженных пород дна Японского моря // Вопросы геологии и геофизики окраинных морей северо-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 175–180.
25. Шевалдин Ю.В. Аномальное магнитное поле Японского моря. М.: Наука, 1978. 78 с.
26. 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, 1980. С. 13–25.

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

после доработки 22.07.2021 г.

принята к печати 26.09.2021 г.

E.A. Bessonova, T.A. Emelyanova, S.A. Zverev, L.A. Izosov

Structural heterogeneities of geological environment in the central part of the Peter the Great Bay, Sea of Japan (according to detailed geomagnetic studies)

Results of detailed geomagnetic survey change existing conceptions about geoenvironment's structure heterogeneity in a substantial way. A new understanding of morphology and mineralogical composition of and depth to the causative bodies has been formed based on the classification of magnetic anomalies and rock magnetic parameters. Issues related to the structural-tectonic zoning of the central part of the bay have been addressed to yield the fault surface of the right wing of the Muraviev horst-anticlinorium and the amplitude of the horst uplift and its width.

Key words: anomalous magnetic field, geomagnetic zoning, magnetic susceptibility, quantitative interpretation, structural-tectonic zoning, Peter the Great Bay, Muraviev horst-anticlinorium.