

УДК 550.382; 550.389; 550.383; 550.83.016

© Ю. А. Копытенко, А. А. Петрова

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург
office@izmiran.spb.ru

КОМПОНЕНТЫ МОРСКИХ ЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ МИРОВОГО ОКЕАНА. ЧАСТЬ 1. СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА

Статья поступила в редакцию 15.02.2018, после доработки 05.11.2018.

Представлены материалы по созданию цифровых карт аномалий вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля зон спрединга в Мировом океане. Рассматривается задача идентификации морских магнитных линейных аномалий не только по модульным данным, но и с учетом преимуществ, которые может дать использование специфики облика аномалий горизонтальной и вертикальной компонент. Аномалии компонент для Мирового океана рассчитаны по компонентной модели магнитного поля Земли СПбФ ИЗМИРАН. На примере срединно-океанического хребта в Северной Атлантике показан облик знакопеременных полосовых магнитных аномалий горизонтальной и вертикальной компонент. На основе изучения изменений структуры аномалий горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля Земли и их интенсивности с высотой сделана оценка эффективности и информативности ориентиров для целей воздушной навигации в зоне спрединга. Представленные в работе компоненты магнитных аномалий могут быть интересны для теории тектоники плит, уточнения возраста литосферы океана и режима формирования океанического дна вследствие пространственно-временного перемещения тектонических плит. Специфика структуры магнитных аномалий зон спрединга повышает значимость параметров навигационной информативности аномалий вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля, что расширяет возможности их использования в автономной корреляционно-экстремальной морской и воздушной магнитной навигации в сложных условиях акваторий океанических бассейнов.

Ключевые слова: морские магнитные аномалии компонент, компонентная модель магнитного поля Земли, морская и воздушная магнитная навигация.

Yu. A. Kopytenko, A. A. Petrova

Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, Russia

COMPONENTS OF MARINE LINEAR MAGNETIC ANOMALIES OF THE WORLD OCEAN. PART 1. NORTH ATLANTIC

Received 15.02.2018, in final form 05.11.2018.

The paper presents new materials on the creation of digital maps of vertical and horizontal anomalies of the magnetic field of the spreading zones in the World Ocean. The results of the calculations are presented in the form of maps of the anomalies of vertical and horizontal components of the induction vector of the Earth's magnetic field for the water area of the World Ocean. The task of identifying marine magnetic linear anomalies is considered not only from modular data, but also taking into account the advantages that the specificity of the appearance of the anomalies of the horizontal and vertical components can give. Component anomalies for the World Ocean are calculated using the SPbF IZMIRAN component model of the Earth's magnetic field. On the example of the mid-oceanic ridge in the North Atlantic, the appearance of alternating strip magnetic anomalies of the horizontal and vertical components is shown. Based on the study of changes in the structure of anomalies of vertical and horizontal component of the Earth's magnetic field and their intensity with height, an assessment was made of the effectiveness and information content of landmarks for the

Ссылка для цитирования: Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Часть I. Северная Атлантика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 34—41.

For citation: Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear Magnetic Anomalies of the World Ocean. Part I. North Atlantic. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 4, 34—41.

doi: 10.7868/S2073667318040056

purposes of air navigation in the spreading zone. The components of magnetic anomalies presented in this paper may be of interest for the theory of plate tectonics, the specification of the age of the ocean lithosphere, and the mode of formation of the ocean floor due to the spatial and temporal movement of tectonic plates. The specificity of the structure of magnetic anomalies of the spreading zones increases the importance of the parameters of the navigation informativity of the anomalies of the vertical and horizontal components of the magnetic field. This expands the possibilities of their use in autonomous correlation-extremal sea and air magnetic navigation in the difficult conditions of the waters of the ocean basins.

Key words: marine magnetic anomalies of components, component model of the Earth's magnetic field, sea and air magnetic navigation.

Морские линейные аномалии модуля и компонент магнитного поля в Мировом океане.

Гидромагнитные измерения магнитного поля, проведенные за последние пятьдесят лет на акватории Мирового океана, привели к открытию уникальной полосчатой структуры аномалий магнитного поля Земли (МПЗ) [1], что сыграло важную роль для многих отраслей науки о Земле, в первую очередь, морской геологии и геотектоники, палеомагнетизма и геофизики [1—7].

Исследование характера знакопеременных магнитных аномалий модуля МПЗ срединно-океанических хребтов показало, что последовательность полос прямой и обратной намагниченности пород дна хорошо коррелирует с палеомагнитной шкалой инверсий, установленной по базальтовым лавам суши и океаническим осадкам. Сопоставление на профилях, секущих срединный хребет, изохроны идентифицированных аномалий модуля со шкалой инверсий подтвердило гипотезу разрастания океанического дна Вайна и Мэтьюза [1—2]. Это позволило им вычислить скорость расширения дна и возраст ложа океана. Предполагая, что скорость постоянна, по полосовым аномалиям дна океана была экстраполирована шкала для более ранних эпох — на десятки и сотни миллионов лет. Были идентифицированы морские наиболее устойчивые положительные аномалии модуля МПЗ, начиная с осевой аномалии зон спрединга срединных хребтов. В результате обобщения материалов гидромагнитных модульных съемок многих лет на основе инверсионно-спрединговой модели для акватории Мирового океана рассчитана карта возраста пород океанического дна по идентифицированным аномалиям модуля (рис. 1, а, см. вклейку), подтверждаемая данными бурения [1—2, 5—7].

Таким образом, спрединговая природа морских магнитных аномалий открыла возможность датировать дно Мирового океана и тем самым восстанавливать эволюцию океанических бассейнов. Картина аномалий модуля вектора МПЗ позволила выделить ряд типичных признаков, присущих магнитным аномалиям океанических хребтов. Она симметрична относительно оси срединного хребта и образована знакопеременными линейно-ориентированными магнитными аномалиями, источники которых определяются как структурные элементы магнитоактивного слоя разрастающейся океанической коры, представленные прямо и обратно намагниченными телами [1—7].

Однако признаки океанической структуры поля по аномалиям модуля МПЗ были обнаружены в ряде районов Мирового океана, которые не являются срединными хребтами. Это районы зон разлома Галапагос [Herron, Heirtzler, 1967; Raff, 1968], акватории между Алеутскими и Гавайскими островами [Elvers et al., 1967], к югу от центральной части Алеутской дуги [Hayes, Heirtzler, 1968] и в Аляскинском заливе [Pitman, Hayes, 1968]. Близкие по облику с полем срединных хребтов линейные аномалии выявлены к востоку от Японии и Курильских островов [Соловьев, 1961; Uyeda et al., 1967]. По данным Гриффитса и др. [Griffiths et al., 1964] и Института геологии Арктики [Трубяччинский и др., 1970], полосчатые знакопеременные аномалии, нарушенные системой ортогональных к ним разломов, развиты в проливе Дрейка, между Южной Америкой и Антарктическим полуостровом [3]. Область развития аномалий полосчатого, знакопеременного, упорядоченного и симметричного магнитного поля в Мировом океане значительно обширнее площади, занимаемой срединными хребтами. Опыт применения компонентной модели МПЗ [8—10] показал, что наиболее четко такие признаки океанической структуры поля в разных частях акваторий Мирового океана проявлены в аномалиях вертикальной (Z) и горизонтальной (H) компонент вектора индукции МПЗ. В связи с этим значительный интерес представляет рассмотрение задачи идентификации морских магнитных линейных аномалий Z и H компонент с учетом особенностей их облика.

Представленные в статье аномалии Z и H компоненты для Мирового океана (рис. 1, б, в) вычислены по компонентной модели МПЗ (рис. 2, см. вклейку) [8—10].

Компонентная модель вектора индукции МПЗ для земного шара была создана в СПбФ ИЗМИРАН по материалам приземных аэромагнитных и гидромагнитных съемок. Модель полных значений компонент МПЗ построена по данным векторных съемок и расчетным значениям компонент, вычисленным по измерениям модуля магнитного поля вблизи поверхности Земли. На ее основе создана цифровая трехмерная компонентная модель для диапазона высот 0—400 км [8—10].

Оценка погрешностей расчетных значений аномалий Z и H компонент выполнена по результатам сравнения аномалий трехмерной компонентной модели с компонентными измерениями Мировой сети геомагнитных обсерваторий и с магнитными аномалиями, полученными на спутниках миссии CHAMP [10]. Проверка качества аномалий компонентной модели МПЗ СПбФ ИЗМИРАН показала, что она применима для автономной морской и воздушной магнитной навигации [8—14].

Цифровые карты аномалий компонент магнитного поля Мирового океана рассчитаны по компонентной модели МПЗ СПбФ ИЗМИРАН за вычетом уровня относимости в виде главного магнитного поля модели IGRF (12 генерации) для 2015—2020 гг. [15—16].

Исследования структуры и свойств аномалий Z и H компонент МПЗ Мирового океана подчеркнули инверсионно-спрединговую природу морских магнитных аномалий срединно-океанических хребтов. Результаты показали, что в зонах спрединга аномалии компонент имеют знакопеременный и полосчатый облик, отвечающий значениям вектора индукции МПЗ в моменты инверсий поля и в периодах между ними (рис. 1).

Однако в процессе глобальных изменений МПЗ перестройка знака и величины полных значений компонент Z и H вектора МПЗ может происходить под влиянием независимых факторов. Например, максимальные значения вертикальной компоненты Z находятся в районе широт $\pm 60^\circ$, а минимальные значения вблизи экваториальной зоны (рис. 2, а). В то же время, максимальные значения горизонтальной компоненты H расположены в экваториальной зоне до широт $\pm 35^\circ$, минимальные значения H — в южной полярной шапке в районе широт $60\text{—}70^\circ\text{S}$, и в северной полярной шапке от 80 до 87°N (рис. 2, б). В моменты инверсий положение и размер области максимальных значений компоненты Z и H , в поле которых происходит остывание излившихся пород океанических базальтов до температуры Кюри, может меняться независимо. В результате этого термоостаточная намагниченность вертикальной и горизонтальной компоненты в разных частях акватории Мирового океана будет сохранять соответствующие значения и направление (знак). Благодаря этому возможно восстановить динамику перемещений магнитных полюсов на земном шаре и размер областей максимальных значений компонент вектора индукции МПЗ за все время разрастания океанического дна.

Таким образом, Z и H компоненты магнитных аномалий привносят дополнительную информацию о намагниченности пород дна океана и характере изменений МПЗ в периоды инверсий, прошедших за время разрастания срединных хребтов акваторий Мирового океана — за 200 млн лет.

Учитывая характер распределения областей максимумов полных значений Z компоненты, наибольшие значения могут иметь морские аномалии вертикальной компоненты в акватории Южного океана, в частности, между Австралией и Антарктидой, что представляет особый интерес для уточнения пространственно-временного перемещения тектонических плит. В северной полярной шапке область наибольших значений Z компоненты могла отразиться на линейных аномалиях Евразийского бассейна Северного ледовитого океана [3]. Повышенные значения термоостаточной намагниченности в областях максимумов Z могут способствовать выявлению тонкой структуры короткопериодных изменений геомагнитного поля, происходивших в прошлом.

Области максимумов полных значений H компоненты, создающие повышенные значения линейных аномалий H компоненты, тяготеют к экваториальной зоне. Например, знакопеременные аномалии H компоненты с амплитудой 50—100 нТл, уверенно прослеживаются в западной части Тихого океана в районе поднятия Шатского, где по аномалиям модуля предполагается существование нескольких систем древних полосовых аномалий [11—17]. Это системы линейных аномалий к востоку от Японских о-вов — Гавайская и Японская, которые разделены возвышенностью Шатского. Японская система на западе срезается глубоководным Японским желобом, а на северо-востоке ограничена Императорским хребтом. Взаимодействия этих систем в настоящее время пока не выяснены, так как аномалии модуля МПЗ в этом районе сложно идентифицировать [14—16]. Однако по аномалиям H компоненты с интенсивностью до более уверенно прослеживается продолжения изохрон, подходящих к поднятию Шатского с юга от широты разлома Мендосино (от № 13 до № 24 по [5, 17—18]), с поворотом

на северо-запад в районе широты 400N (рис. 1, *в*). Время образования океанического ложа в районе этих древних аномалий оценивается в 150—180 млн лет [5, 7].

Таким образом, морские линейные аномалии являются основой для тектонических реконструкций перемещений океанических плит. По ним формируется база данных, из которой на основе инверсионно-спрединговой модели рассчитывается возраст литосферы океанического дна. Идентификация морских магнитных аномалий модуля сыграла исключительно важную роль в развитии теории тектоники плит [1—7].

Однако именно компоненты морских линейных магнитных аномалий являются непосредственными носителями информации об образовании термоостаточной намагниченности магнитоактивного слоя океанической земной коры. Поэтому идентификация компонент этих аномалий приносит уникальную дополнительную информацию о характере намагниченности пород дна в разные периоды инверсий МПЗ, придавая тем самым новый импульс пространственно-временным представлениям о реконструкциях тектонических плит Мирового океана.

Структура компонент полосовых аномалий срединного хребта Северной Атлантики. Северо-Атлантический хребет является одним из наиболее ярко выраженных примеров срединно-океанических хребтов. Он приурочен к дивергентной границе, по которой происходит горизонтальное растяжение литосферы и раздвижение Северо-Американской и Евразийской плит со скоростью около 4 см в год. Рифтовая долина хребта имеет ширину ~50 км. Линейные магнитные аномалии параллельны оси срединного хребта и расположены симметрично по отношению к ней. Знакопеременный характер магнитных аномалий Северо-Атлантического хребта соответствует палеомагнитным данным, так как последовательность полос прямой и обратной намагниченности пород хорошо коррелирует с геомагнитной шкалой инверсий [1—5].

Сопоставление вдоль профилей, секущих срединный хребет, изохрон знакопеременных аномалий со шкалой инверсий подтвердило инверсионно-спрединговую модель гипотезы Вайна и Мэтьюза [1]. По линейным магнитным аномалиям модуля МПЗ, экстраполированным на сотни миллионов лет назад, была построена первая карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике (рис. 3, *а*, см. вклейку) [1].

Фрагмент современной карты идентифицированных аномалий, окрашенных в соответствии с палеомагнитной шкалой, приведен для Северной Атлантики (рис. 3, *б*).

Картина аномалий модуля вектора МПЗ в Северной Атлантике подчеркивает ряд типичных признаков, присущих магнитным аномалиям мировой системы океанических хребтов за период 0—160 млн лет.

Карты аномалий компонент H и Z Атлантического хребта, построенные для уровня океана (рис. 1, *б*, *в*; 4, *а*; 5, *а*, см. вклейку) показывают, что они имеют знакопеременный и полосчатый облик, отражая величину и направление вектора индукции МПЗ в моменты инверсий поля и в периодах между ними. Морские линейные аномалии компонент симметричны относительно оси хребта и образованы линейно-ориентированными элементами магнитоактивного слоя океанической коры. Специфика структуры магнитных аномалий зон спрединга повышает значимость параметров навигационной информативности аномалий компонент магнитного поля. Это расширяет возможности их использования в автономной корреляционно-экстремальной морской и воздушной магнитной навигации в океанических бассейнах [10—14].

Информативными для задач магнитной навигации являются районы с достаточно высокой контрастностью навигационных параметров, в первую очередь, величины амплитуды аномалий, которая должна превышать уровень погрешности более, чем в 2 раза.

Наибольший практический интерес для воздушной магнитной навигации в условиях акваторий океанических бассейнов представляет анализ повысотных изменений структуры аномалий Z и H компонент МПЗ от уровня океана на высоты полета летательных аппаратов.

Для воздушной (аэрокосмической) навигации, использующей трехкомпонентные магнитометры на летательных аппаратах, определяются приоритетные коридоры высот. В связи с этим в настоящее время уделяется большое внимание информации о распределении элементов магнитного поля Земли на разных высотах [11]. Первостепенное значение уделяется информативности аномалий компонент на приоритетных высотах.

Именно этот аспект — изучение изменений спектральных характеристик аномалий Z и H компонент МПЗ и их интенсивности — имеет исключительно важное значение для оценки эффективности и информативности решения задач воздушной навигации. Так, например, величина амплитуды аномалий этих компонент внутри приоритетных коридоров должна превышать уровень погрешности измерений, выполненных носителем на заданной высоте, более чем в 2 раза.

С целью оценки изменения с высотой величины амплитуды аномалий модуля, вертикальных и горизонтальных компонент МПЗ проведены расчеты полей от уровня океана $h = 0$ км на высоты 5, 10 и 20 км (рис. 4—5). Погрешность на высоте $h = 0$ км составляет ~ 20 нТл (2σ). Результаты анализа в виде среднеквадратической оценки (СКО) амплитуды магнитных аномалий модуля $((\Delta T)_a)$, вертикальной $((\Delta Z)_a)$ и горизонтальной $((\Delta H)_a)$ компоненты срединного хребта для изохрон от № 0 до № 34 в интервале 0—80 млн лет (рис. 3—5) приведены в таблице.

Таким образом, исследование изменений интенсивности идентифицируемых линейных магнитных аномалий модуля и компонент с высотой в районе срединного хребта Северной Атлантике показало, что они достаточно информативны, что используется в магнитной морской и воздушной навигации [11—13, 19]. Расчеты полей от уровня океана $h = 0$ км до высот 5, 10 и 20 км в зоне срединно-океанического хребта позволили оценить в приоритетных высотных коридорах Северной Атлантики навигационные ориентиры, превышающие уровень погрешности измерений, более чем в 2 раза.

Особый интерес вызывает исследование неоднородностей глубинного строения океанического дна и зон спрединга. В результате проведения комплексной интерпретации аномалий силы тяжести, глубин очагов землетрясений и магнитным аномалиям выявлена специфика внутреннего строения литосферы Срединно-Атлантического хребта. Визуализация неоднородностей земной коры в виде геофизических разрезов совместно с данными эпицентров землетрясений позволила оценить особенности глубинного строения земной коры. В основе методики построения магнитных и плотностных разрезов лежит спектрально-пространственное представление аномалий поля, конвертируемых в глубинные разрезы [20—26].

Представление о плотностных неоднородностях строения океанической коры, имеющей возраст 0—160 млн лет, дает модель глубинного плотностного разреза, пересекающего Срединно-Атлантический хребет (рис. 6, а, см. вклейку). Плотностной разрез построен по аномалиям силы тяжести, измеренным спутником GRACE [27].

Сопоставление плотностного разреза с глубинами очагов землетрясений вблизи линии профиля по данным корпорации IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), являющейся мировым лидером исследований в области сейсмологии [28], показало, что расположение очагов хорошо согласуется с полученной картиной распределения плотностных образований. Эпицентры землетрясений тяготеют к контактам пород разной плотности на кровле, подошве и на латеральных границах плотностных неоднородностей горизонтов и блоков (рис. 6). В осевой зоне хребта на глубине порядка 10 км к верхней границе плотных локализованных объектов приурочены очаги типа сбросов, а в западной части профиля в области древних участков ось напряжения — сжатие очагов землетрясений направлена с северо-востока на юго-запад, что отвечает погружению этого горизонта. На глубине около 18 км эпицентры приходятся на кровлю образований нижележащего более мощного слоя, очаги землетрясений около 22—30 км — на кровлю следующего менее плотного, но более протяженного слоя, распространяющегося от осевой зоны хребта до древних участков с возрастом дна более 140 млн лет. Эти очаги характеризуются сбросовым механизмом с элементами сдвигов по простиранью. В осевой зоне

Таблица 1

**Изменение с высотой интенсивности линейных магнитных аномалий модуля
и компонент Северо-Атлантического хребта**

**Variation with height of the intensity of linear magnetic anomalies of the module
and components of the North Atlantic Ridge**

Высота, км	$h = 0$ км	$h = 5$ км	$h = 10$ км	$h = 20$ км
СКО $(\Delta T)_a$, нТл	600	400	255	120
СКО $(\Delta Z)_a$, нТл	550	360	240	110
СКО $(\Delta H)_a$, нТл	380	300	230	130

есть очаги землетрясений на глубинах около 50—54 км, которые тяготеют к нижней границе (подошве) мощной плотностной неоднородности в мантии.

Представление о магнитных слоях земной коры океана, имеющей возраст 0—160 млн лет [1], расположении гидротермальных зон и распределении намагниченности в разных слоях пород дна дает геомагнитный разрез, построенный по магнитным аномалиям модуля (рис. 6, б) [10]. Разрез пересекает осевую зону Срединно-Атлантического хребта в районе термального поля Лост Сити [Ю. Богданов и др., 2004]. В районе оси хребта на разрезе видны слабомагнитные линзы магматических камер в интервале глубин 15—30 км. Дивергентная граница между Северо-Американской и Евразийской тектоническими плитами приурочена к субвертикальному разлому на оси хребта. Она отслеживает траекторию термофлюидного потока вертикальными цепочками слабомагнитных линз, начиная с глубины около 40 км.

В разрезе по аномалиям вертикальной компоненты Z (рис. 7, а, см. вклейку) термоостаточная намагниченность магнитоактивных слоев в осевой зоне и в области 0—60 млн лет проявлена более выразительно, чем при расчетах по аномалиям модуля (рис. 6, б). На разрезе по аномалиям горизонтальной компоненты H в районе хребта слабомагнитные линзы магматических камер видны на глубине 15—30 км (рис. 7, б). Дивергентная граница по разлому отражена в виде вертикальных цепочек слабомагнитных линз, которые трассируют термофлюидный поток с глубины 30 км.

Магнитные и плотностные разрезы позволили оценить мощность и свойства неоднородностей фундамента Северо-Атлантического хребта. По геомагнитным разрезам наиболее магнитоактивные слои линейных магнитных аномалий с возрастом 0—60 млн лет расположены в интервале глубин 5—15 км. Источники более древних аномалий — 80—150 млн лет — залегают на глубинах от 10—15 км. Они имеют уменьшенную (почти в 3 раза) намагниченность и плотность, чем образования с возрастом 0—60 млн лет.

Обсуждение и выводы. Идентификация магнитных аномалий является основой для тектонических пространственно-временных реконструкций движений океанических плит. Она формирует набор первичных данных, из которых рассчитывается возраст литосферы и режим формирования дна в океанических бассейнах Мирового океана. Идентификация магнитных аномалий модуля сыграла важную роль в становлении и развитии теории тектоники плит, а исследования и интерпретация морских магнитных аномалий модуля привели к важным открытиям, сделанным в морской геологии и палеомагнетизме [1—7].

Однако представленные новые материалы по созданию цифровых карт аномалий вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля зон спрединга открывают принципиально новые возможности в морской геологии и палеомагнетизме. Идентификация Z и H компонент морских линейных магнитных аномалий, являющихся основными и непосредственными свидетелями образования магнитоактивного слоя океанической земной коры, дает исключительно важную дополнительную информацию о характере намагниченности пород дна в разные периоды инверсий МПЗ. Применение данных о линейных аномалиях Z и H компонент вместо аномалий модуля МПЗ, весьма вероятно, придаст новый импульс пространственно-временным представлениям о реконструкциях тектонических плит Мирового океана и расширит представление о строении океанического дна.

Особенности структуры магнитных аномалий вертикальной и горизонтальной компонент зон спрединга существенно повышают значимость параметров навигационной информативности магнитного поля. Они увеличивают насыщенность навигационными ориентирами МПЗ с целью определения текущего местоположения в экстремальной ситуации. Это существенно расширяет возможности морской и воздушной магнитной навигации.

Вертикальная и горизонтальная компоненты морских магнитных аномалий, по сравнению с аномалиями модуля, воссоздают более четкое представление о характере изменений компонент вектора МПЗ в периоды инверсий, произошедших за все время формирования морского дна Мирового океана. Дальнейшие детальные исследования магнитных аномалий Z и H компонент создают предпосылки для выявления короткопериодных изменений геомагнитного поля в прошлом, т.е. тем самым могут предоставить важные сведения о динамике изменений генерации МПЗ.

Представленная в работе информация о цифровых картах Z и H компонент линейных магнитных аномалий срединно-океанических хребтов может оказаться весьма своевременной в связи с началом глобального проекта по созданию цифровой модели морского дна Мирового океана. В настоящее время

она осуществляется на основе идентифицированных линейных магнитных аномалий модуля с учетом данных измерений градиента альтиметрии, позволяющих обеспечить отслеживание зон разломов [29—31]. Возможность применения цифровой модели аномалий вертикальной и горизонтальной компонент вместо аномалий модуля МПЗ делает эту задачу особенно актуальной, более эффективной и информативной. Идентификация компонент морских линейных магнитных аномалий позволит уточнить и детализировать проект по созданию цифровой модели морского дна Мирового океана.

Литература

1. Vine F. J., Matthews D. H. Magnetic anomalies over ocean ridges // *Nature*. 1963. V. 199, N 4897.
2. Pitman W. C., Talwani M. Sea-floor spreading in the North Atlantic // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. V. 83. P. 619—649.
3. Карасик А. М. Магнитные аномалии океана и гипотеза разрастания океанического дна // *Геотектоника*. 1971. № 2. С. 3—18.
4. Храмов А. Н. (Ред.) Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
5. Gee J. S., Kent D. V. Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity time scale // *Treatise on Geophysics*. V. 5, chap. 12. Edited by M. Kono. Elsevier, Amsterdam, 2007. P. 455—507.
6. Gradstein F. M., Ogg J. G., Schmitz M. D., Ogg G. M. The Geologic Time Scale 2012. Cambridge University Press, 2012. 589 p. doi: 10.4095/215638
7. Seton M., Whittaker J., Wessel P., Müller R. D., DeMets C., Merkouriev S., Cande S., Gaina C., Eagles G., Granot R., Stock J., Wright N., Williams S. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2014. V. 15. P. 1629—1641. doi: 10.1002/2013GC005176.
8. Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Магнитные карты нового поколения для целей морской магнитной навигации // *Труды XII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА — 2014»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 258—261.
9. Петрова А. А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // *Сб. трудов ИЗМИРАН*, М.: 2015. С. 412—423.
10. Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 2. С. 88—106.
11. Непоклонов В. Б., Петрова А. А., Августов Л. И. Результаты исследований навигационной информативности аномалий гравитационного и магнитного полей Земли на высотах до 20 км // *Труды XXX конференции памяти Н. Н. Острякова*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. С. 389—397.
12. Копытенко Ю. А., Петрова А. А., Августов Л. И. Анализ информативности магнитного поля Земли для автономной корреляционно-экстремальной навигации // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 1. С. 61—67.
13. Щербаков И. А., Петрова А. А. Магнитная навигационная карта // *Записки по гидрографии*. 2017. № 304. С. 35—40.
14. Матисов В. Я., Петрова А. А. О выборе способа получения информации об элементах земного магнетизма в задаче компенсации магнитного поля индуктивного намагничивания корабля // *Тр. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности»* СПб., 2017. С. 30—35.
15. Thébault E., Finlay C., Beggan C., Alken P. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. Springer, 2015. doi:10.1186/s40623-015-0228-9.
16. Chulliat A., Macmillan S., Alken P., Beggan C., Nair M., Hamilton B., Woods A., Ridley V., Maus S., Thomson A. The US/UK World Magnetic Model for 2015—2020: Technical Report, National Geophysical Data Center, NOAA. 2015. P. 1—106. doi: 10.7289/V5TB14V7.
17. Zhang J., Sager W., Korenaga J. The Shatsky Rise oceanic plateau structure from two-dimensional multichannel seismic reflection profiles and implications for oceanic plateau formation // *Special Paper of the Geological Society of America*. 2015. doi: 10.1130/2015.2511(06).
18. Sager W. W. What built Shatsky Rise, a mantle plume or ridge tectonics? // *Geological Society of America*. 2005. Paper 388. P. 721—733.
19. Петрова А. А., Карасик А. М. Статистическая зависимость параметров спектральной структуры магнитного поля от рельефа магнитного фундамента Северного Ледовитого океана // *Океанология*. 1979. Т. XIX, № 3. С. 526—528.
20. Петрова А. А. Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля // *Автореф. дис. канд. ф.-м. наук*. М.: ИЗМИРАН, 1976. 25 с.
21. Петрова А. А. Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля. // *Геофизический сборник АН УССР*. 1977. Вып. 76. С. 55—66.
22. Hahn A., Kind E. G., Mishra D. C. Depth estimation of magnetic sources by means of Fourier amplitude spectra // *Geophys. Prospect*. 1976. V. 24. P. 287—308.
23. Петрова А. А., Колесова В. И. Способ геофизической разведки. А.С. 1289232 СССР // *Б.И.* 1986. № 15. С. 45.
24. Петрищев М. С., Петрова А. А., Копытенко Ю. А. Глубинное строение термальных зон по результатам комплексирования геофизических полей // *38-ая сессия международного научного семинара «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» им. Д. Г. Успенского*. Пермь, ГИ УрО РАН, 2014. С. 24—28.
25. Петрова А. А., Петрищев М. С. Флюидные системы Средиземноморья // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2011. № 1. Вып. № 17. С. 23—33.

26. Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Пути повышения ресурсного потенциала Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках проекта «Урал промышленный — УРАЛ Полярный» по геомагнитным данным // Материалы межрегионального проекта «Дни науки и инноваций Санкт-Петербурга в Ямало-Ненецком автономном округе», СПб—Салехард. ЯНАО: Изд-во ООО «Артвид», 2011. С. 40—63.
27. Kaban MK, Reigber C. New possibilities for gravity modeling using data of the CHAMP and GRACE satellites // *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*. Nov. 2005. V. 41, Iss. 11. P. 950—957.
28. IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). URL: <http://ds.iris.edu> (дата обращения: 08.02.2018).
29. Wessel P., Matthews K. J., Müller R. D., Mazzoni A., Whittaker J. M., Myhill R., Chandler M. T. Semiautomatic fracture zone tracking // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2015. V. 16 (7). P. 2462—2472. doi:10.1002/2015GC005853.
30. Wessel P., Müller R. D. The Global Seafloor Fabric and Magnetic Lineation Data Base. URL: <http://www.soest.hawaii.edu/PT/GSFML/> (дата обращения: 12.01.2018).
31. Müller R. D. et al. The GPlates Portal: Cloud-Based Interactive 3D Visualization of Global Geophysical and Geological Data in a Web Browser // *J. PLoS One*. 2016. V. 11(3). doi: 10.1371/journal.pone.0150883.

К статье Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

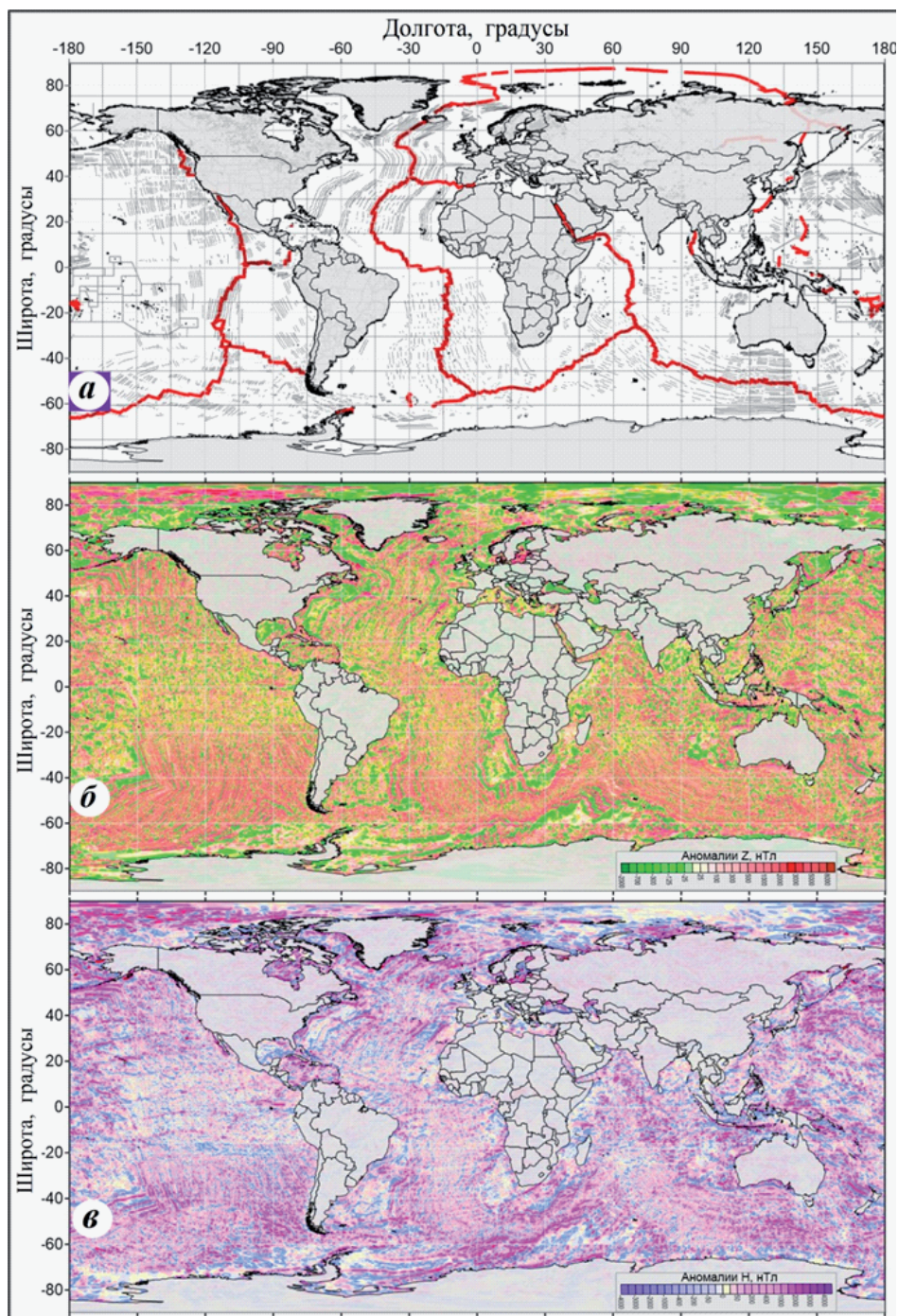


Рис. 1. Схема идентифицированных линейных аномалий Мирового океана (а) [2, 5—7] и карта аномалий вертикальной Z (б) и горизонтальной H (в) компонент МПЗ [10].

Fig. 1. Scheme of identified linear anomalies of the World Ocean (a) [2, 5—7]; a map of the anomalies of the vertical Z (b) and horizontal H (c) components of the Earth's magnetic field [10].

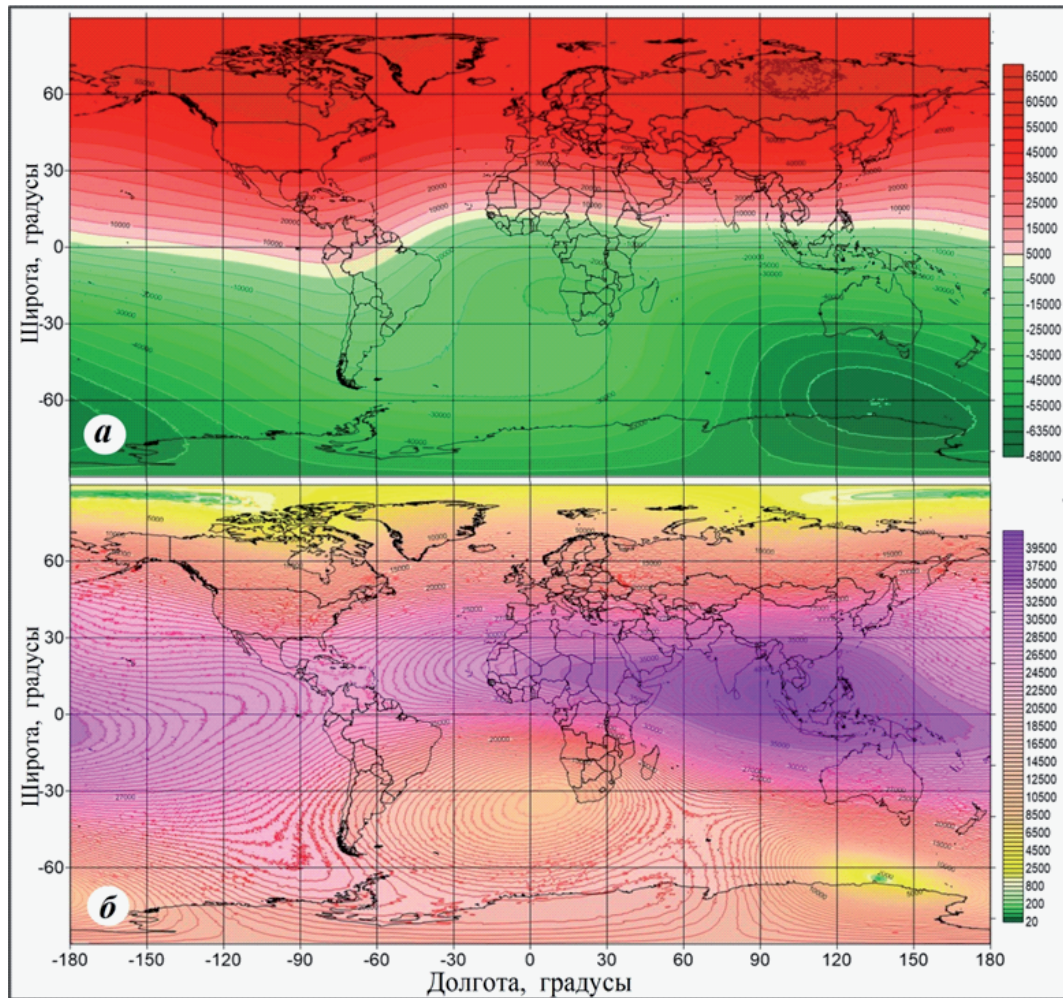


Рис. 2. Мировая карта полных значений вертикальной Z (а) и горизонтальной H (б) компонент МПЗ на уровне океана (шкала в нТл) [10].

Fig. 2. World map of the total values of the vertical Z (a) and horizontal H (b) components of the Earth's magnetic field at the ocean level (scale in NT) [10].

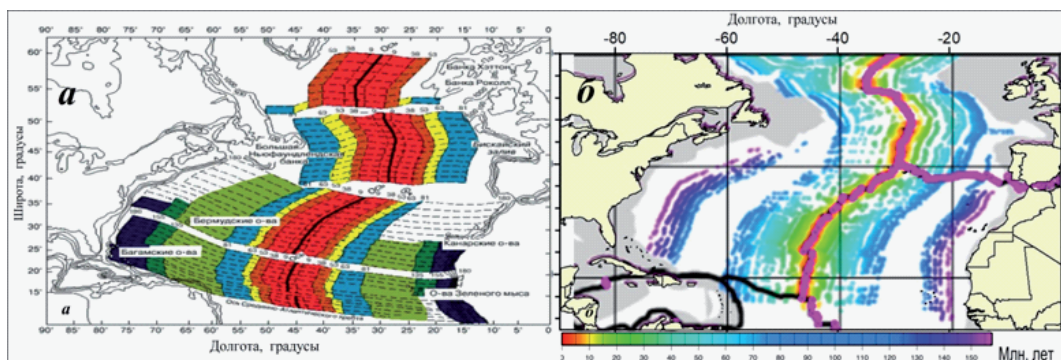


Рис. 3. Карта возраста пород океанического ложа Северной Атлантики [1] (а); фрагмент современной карты идентифицированных магнитных аномалий модуля, окрашенных по геомагнитной шкале [5] (б).

Fig. 3. Map of the age of rocks in the ocean bed of the North Atlantic [1] (a); fragment of the modern map of the identified magnetic anomalies of the module, colored according to the geomagnetic scale [5] (b).

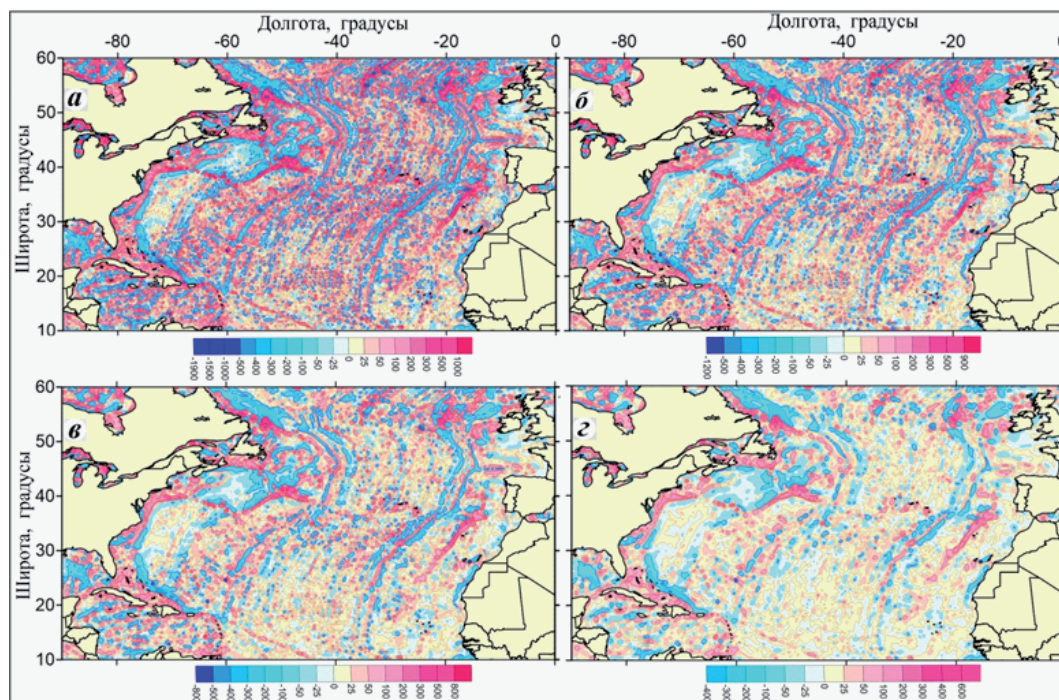


Рис. 4. Изменение облика вертикальной компоненты Z морских магнитных аномалий при увеличении высоты от $h = 0$ км (а) до $h = 5$ км (б), $h = 10$ км (в) и $h = 20$ км (г).

Fig. 4. Change in the image of the vertical component Z of the sea magnetic anomalies with increasing height from $h = 0$ km (a) to $h = 5$ km (b), $h = 10$ km (c) and $h = 20$ km (d).

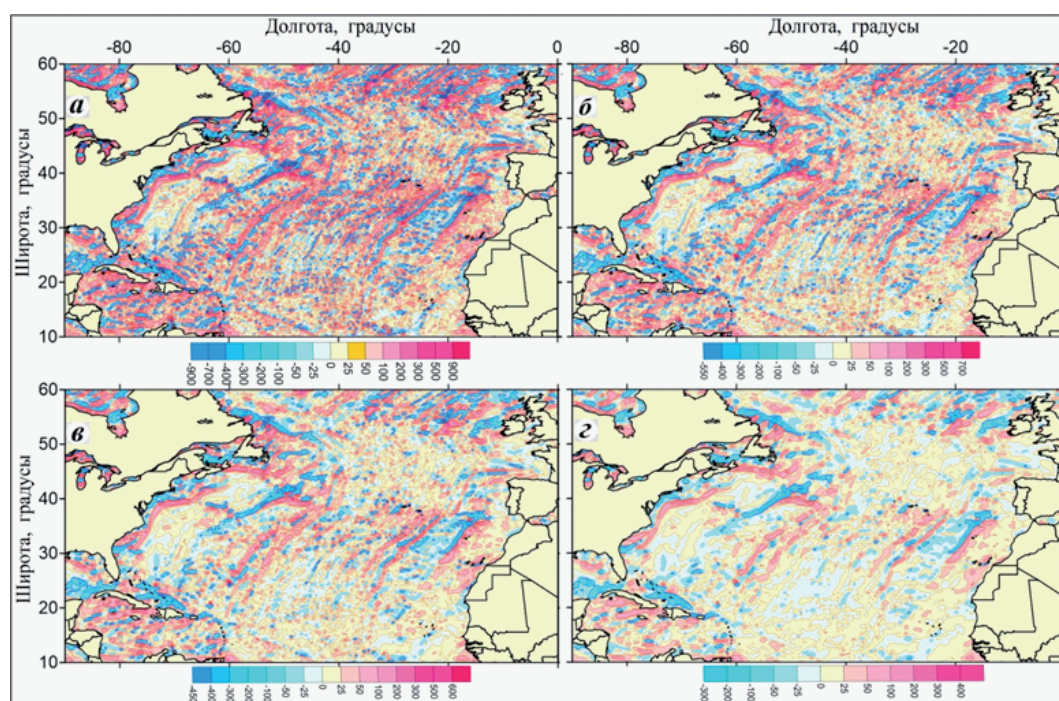


Рис. 5. Изменение облика горизонтальной компоненты H морских магнитных аномалий при увеличении высоты от $h = 0$ км (а) до $h = 5$ км (б), $h = 10$ км (в) и $h = 20$ км (г).

Fig. 5. Change in the image of the horizontal component H of marine magnetic anomalies with increasing height from $h = 0$ km (a) to $h = 5$ km (b), $h = 10$ km (c) and $h = 20$ km (d).

К статье Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Компоненты морских линейных...
 Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

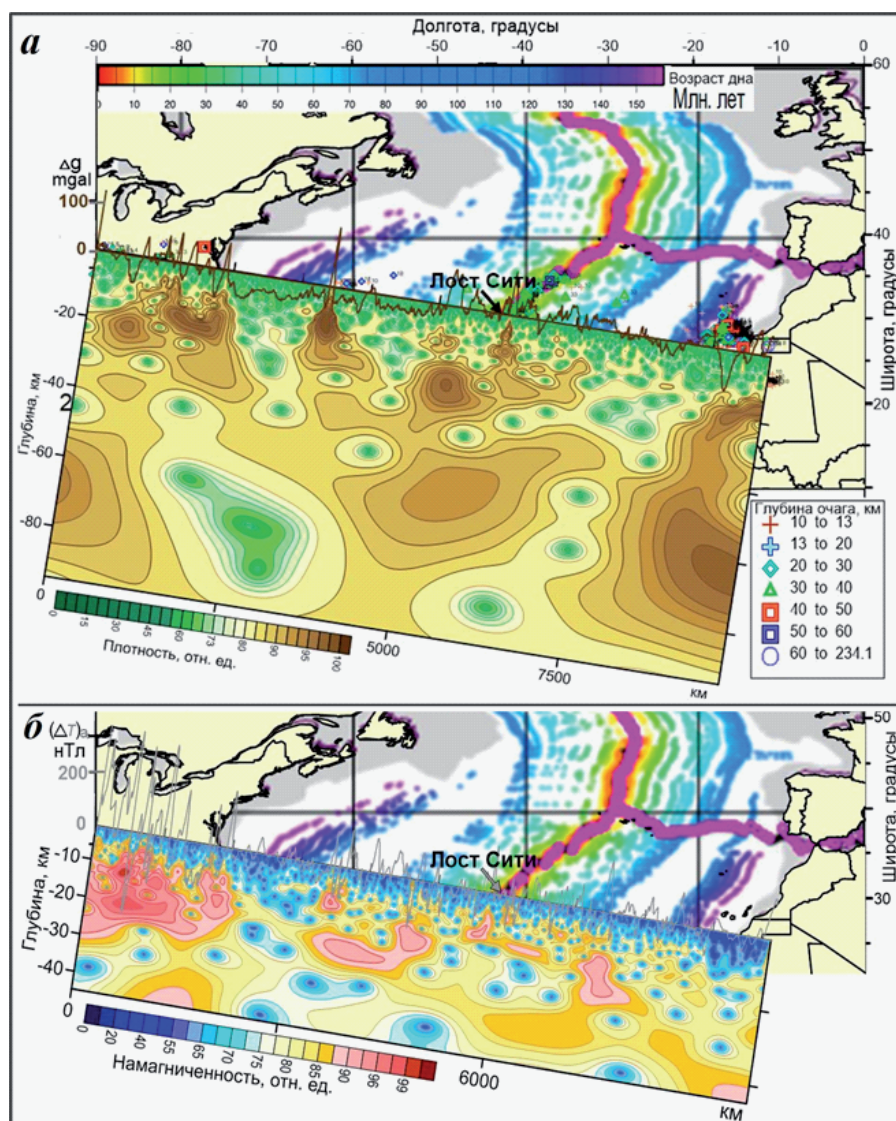


Рис. 6. Глубинные разрезы через Срединно-Атлантический хребет: плотностной (а) и геомагнитный по аномалиям модуля МПЗ (б).

Fig. 6. Deep section through the Mid-Atlantic Ridge: density (a) and geomagnetic by the anomalies of the module of the Earth's magnetic field (b).

К статье Копытенко Ю. А., Петрова А. А. Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

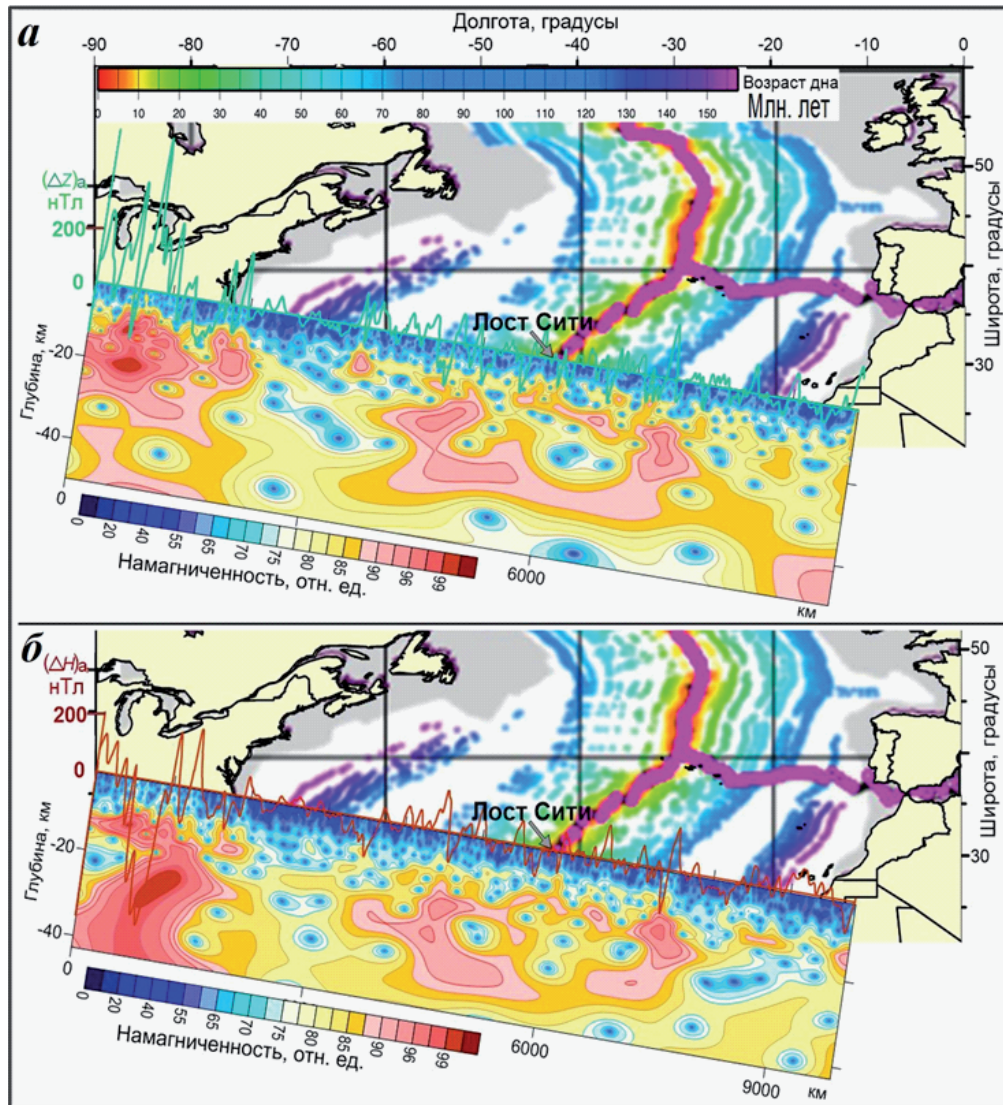


Рис. 7. Геомагнитный разрез по аномалиям вертикальной (а) и горизонтальной (б) компоненты МПЗ через Срединно-Атлантический хребет.

Fig. 7. Geomagnetic section by the anomalies of the vertical (a) and horizontal (b) components of the Earth's magnetic field through the Mid-Atlantic Ridge.