

УДК 550.382; 550.389

© Ю. А. Копытенко, А. А. Петрова

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Россия
office@izmiran.spb.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ИНТЕРЕСАХ МАГНИТНОЙ КАРТОГРАФИИ И ГЕОФИЗИКИ

В статье обобщены результаты исследований Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) по изучению магнитного поля Земли, а также рассмотрены новые вопросы в части построения основ пространственной цифровой модели компонент магнитного поля Земли. Компонентная модель строится по материалам векторных съемок и расчетных значений компонент, вычисленных по измерениям модуля полного вектора индукции магнитного поля вблизи поверхности Земли. Приведены статистические оценки погрешностей при сравнении вычисленных значений компонент магнитного поля Земли по модели для всего земного шара с результатами измерений на мировой сети наземных геомагнитных обсерваторий и магнитных станций. Вычисленные по модели магнитные аномалии компонент и модуля магнитного поля Земли вблизи земной поверхности и пересчитанные затем на высоты 100 и 400 км, где проводились измерения магнитного поля Земли спутником CHAMP, показали хорошее соответствие во всех регионах земного шара. На основе компонентной модели предложены решения следующих задач: изучение глубинного строения земной коры на акваториях Северного Ледовитого и Тихого океанов; локализации возобновляемых месторождений углеводородов на акватории Северного моря; распределения геотермальных областей на территории Западной Европы. Мировые магнитные карты компонент магнитного поля Земли используются в морской и воздушной магнитной навигации, включая экстремальные условия. Они представляют интерес при изучении строения земной коры и мантии, а также для выделения перспективных областей на поиск полезных ископаемых, включая труднодоступные регионы земного шара.

Ключевые слова: компонентная модель магнитного поля Земли, магнитная навигация, месторождения углеводородов, геотермальные области.

Yu. A. Kopytenko, A. A. Petrova

Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of RAS St.-Petersburg Branch, Russia
office@izmiran.spb.ru

THE DEVELOPMENT AND USE OF A COMPONENT MODEL OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD FOR MAGNETIC CARTOGRAPHY AND GEOPHYSICS

The paper summarizes the results of researches on the study of the Earth's magnetic field made in St.-Petersburg Branch of Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of RAS. New problems in building the foundations of a spatial digital model of a component model of the Earth's magnetic field are discussed. The component model is built based on vector magnetic surveys and estimated component values calculated by dimensions of module of magnetic field induction's full vector near the Earth's surface. The statistical error estimates of calculated values of the model based on the results of measurements on the World network geomagnetic observatories and magnetic anomalies derived from measurements of the satellite CHAMP are given. On the basis of the component model the solving of the following tasks is proposed: the study of the deep structure of the Earth's crust in the waters of the Arctic and Pacific Oceans; the study of hydrocarbon deposits in the North Sea; the study of allocation of geothermal areas in Western Europe. World magnetic maps of components of Earth's magnetic field are used in sea and air magnetic

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—96.

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. The development and use of a component model of the Earth's magnetic field for magnetic cartography and geophysics. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 2, 88—96.

navigation, including extreme conditions. They are of interest when studying the structure of the crust and mantle, and to allocate promising areas for search of minerals, including hard-to-reach regions of the globe.

Key words: component model of the Earth's magnetic field, magnetic navigation, long-lived hydrocarbon deposits, geothermal area.

Исследования компонент магнитного поля Земли в СПбФ ИЗМИРАН. Институт Земного магнетизма (НИИЗМ, в дальнейшем — ЛОИЗМИРАН, СПбФ ИЗМИРАН) традиционно занимается исследованием пространственного распределения элементов земного магнетизма и его вековых вариаций на территории бывшего СССР, России и акватории Мирового океана [1—3]. С 1937 г. на основе данных наземной генеральной магнитной съемки, проводимой в Институте земного магнетизма, строились магнитные карты России. С 1965 г. в Институте регулярно на бумажной основе изготавливались по данным компонентной наземной генеральной съемки и измерений элементов МПЗ на маломagnetной шхуне НИС «Заря» Мировые магнитные карты элементов земного магнетизма, магнитные карты России и акватории Мирового океана [4, 5].

В 1980 г. на основе данных компонентной наземной генеральной съемки, измерений элементов магнитного поля Земли (МПЗ) на НИС «Заря» и аэромагнитных компонентных измерений положено начало организации базы данных МПЗ под управлением специализированной системы накопления, хранения и обработки информации [6].

Несмотря на увеличивающуюся потребность в магнитных картах элементов земного магнетизма, с 1990-х гг. в России не выполняются масштабные работы по компонентной магнитной съемке. Вместе с тем, в развитых странах значительное развитие получили современные гидро- и аэромагнитные измерения модуля полного вектора МПЗ.

В СПбФ ИЗМИРАН (ЛОИЗМИРАН), который более 75 лет занимался изучением элементов земного магнетизма, была разработана оригинальная методика вычисления расчетных карт векторных составляющих магнитного поля, получаемых на основе измерений модульной информации, что позволило повысить детальность карт компонент вектора индукции МПЗ [3, 7].

Основные принципы оригинальной методики составления расчетных карт векторных составляющих МПЗ были предложены в СПбФ ИЗМИРАН и широко опубликованы, начиная с 1984 г. [7—12]. Авторы успешно опробовали методику на натурных полигонах, выполненных шхунной НИС «Заря» в Балтийском море, а также на территориях Среднего Урала, Финляндии и других регионов, заснятых наземной компонентной съемкой [13]. Это дало возможность к 2008 г. увеличить детальность карт магнитного склонения России и расширить площади, охваченные информацией о магнитном склонении, для целого ряда районов Мирового океана.

В настоящее время на современной вычислительной технике методика получила дальнейшее развитие. Появилась возможность расширения магнитометрической базы компонент и создания основ цифровой компонентной модели МПЗ для всего земного шара. В результате этого, используя базу имеющихся измеренных данных по компонентам МПЗ, а также расчетные значения компонент по материалам аэромагнитных и гидромагнитных модульных съемок [14], для уровня океана могут быть построены магнитные карты элементов земного магнетизма [15].

С целью разработки основ пространственной (трехмерной) модели компонент вектора индукции МПЗ для земного шара в СПбФ ИЗМИРАН проведены исследования спектрально-пространственной структуры МПЗ океанов и континентов на всех доступных уровнях — от уровня океана и до высоты ≈ 400 км [16—20].

На основе проведенной работы в настоящее время создается новое поколение цифровых магнитных карт компонент МПЗ для Мирового океана и околоземного пространства, имеющих фундаментальное, поисковое и прикладное значение.

Мировые карты магнитного склонения (D), магнитного наклонения (I), горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент вектора индукции МПЗ используются для целей морской и воздушной магнитной навигации, изучения глубинного строения литосферы, исследования долгоживущих месторождений углеводородов (УВ), выявления геотермальных областей и поиска источников подземных термальных вод с последующей детализацией методами электромагнитных зондирований [15]. На рис. 1 (см.вклейку) представлен пример результатов расчета Мировых карт D (рис. 1, а), H (рис. 1, б) и Z (рис. 1, в) по модели компонент МПЗ для уровня океана. Наибольшая изрезанность, обусловленная

влиянием аномалий литосферных источников по D (рис. 1, a) отмечается в районах минимумов в Северном Ледовитом океане и на Сибирской платформе, по H (рис. 1, b) — в южной части Тихого и Индийского океанов. Литосферные аномалии Z (рис. 1, $в$) ярко выражены вблизи южного магнитного полюса и в районе мировой Восточно-Сибирской магнитной аномалии.

Статистическая оценка погрешностей расчетных данных компонентной модели МПЗ на приземном уровне. Оценка погрешностей расчетных данных по компонентной модели на приземном уровне выполнена статистическими методами сравнением с измерениями в геомагнитных обсерваториях Мировой сети (рис. 2, a , см.вклейку) [21—25]. Расположение геомагнитных обсерваторий Мировой сети отмечено точками, закрашенными в цвета шкалы уровней расхождений расчетных значений по модели и измеренных в обсерваториях.

Статистическая обработка показала, что случайные погрешности расхождений между расчетными значениями компонент МПЗ по модели и измеренными в Мировой сети геомагнитных обсерваторий могут быть описаны при помощи нормального закона распределения Гаусса. Поскольку величина выборки N представительна (~300 точек измерений) (см.таблицу, колонка 2), то погрешности расчета могут быть вычислены с применением критерия Стьюдента.

Среднеарифметические значения расхождений приведены в таблице (колонка 3). С доверительной вероятностью 95 % и соответствующим выборкам коэффициентов Стьюдента рассчитаны доверительный интервал, среднеквадратическая погрешность средних значений расхождений элементов МПЗ (колонка 4) и среднестатистические значения расчетных данных по модели (колонка 5).

Вычисленные среднеквадратические отклонения (СКО) расхождений между расчетными значениями компонент МПЗ по модели и измеренными в Мировой сети геомагнитных обсерваторий (см.таблицу, колонка 6) можно считать мерой неопределённости отклонений магнитных аномалий от «средних значений расхождений» (см.таблицу, колонки 3 и 6).

Статистический анализ погрешностей показал, что расхождение расчетных значений карт магнитного склонения с данными определений D в геомагнитных обсерваториях имеет СКО менее 0.1° для 53 % ($N = 117$ случаев измерений), менее 0.2° для 70 % ($N = 176$) измерений в обсерваториях (рис. 2, a). Для магнитного наклонения I СКО составляет менее 0.1° — 66 % ($N = 170$), менее 0.2° — 86 % ($N = 188$). Для горизонтальной и вертикальной компонент H и Z СКО равно 50 нТл в 58 % ($N = 120$), менее 80 нТл для 70 % ($N = 176$) случаев измерений. При этом критические значения грубых расхождений, вычисленные по критерию Романовского [25] с вероятностью 0.01, для магнитного склонения составляет 1.6° , для $H = 500$ нТл, для $Z = 400$ нТл. Наибольшие значения расхождений приходятся на обсерватории, расположенные в областях магнитных аномалий на станции KIR (Швеция), а также на станциях SBA (США) и SPA (Новая Зеландия) в Антарктиде. Здесь и далее геомагнитные обсерватории и станции представлены трехбуквенными кодами в соответствии с обозначениями Международной Ассоциации Геомагнетизма и Аэронавтики (МАГА) (<http://www.iugg.org/IAGA/>).

Статистическая оценка погрешностей расчетных данных модели компонент магнитного поля Земли по измерениям в околоземном пространстве. Пространственная модель компонент вектора индукции МПЗ предусматривает возможность построения цифровых магнитных карт в диапазоне высот 0—400 км.

Среднестатистические оценки расхождений между расчетными и измеренными значениями компонент МПЗ на Мировой сети геомагнитных обсерваторий по всему земному шару

Компонента МПЗ	Число обсерваторий (N)	Среднее значение расхождений	Доверительный интервал	Среднестатистическое значение расчетных данных	СКО расчетных и наблюдаемых данных
F	315	31 нТл	± 14 нТл	31 ± 14 нТл	131 нТл
Z	279	9 нТл	± 13 нТл	9 ± 13 нТл	110 нТл
H	299	11 нТл	± 11 нТл	11 ± 11 нТл	100 нТл
D	267	0.01°	$\pm 0.02^\circ$	$0.01 \pm 0.02^\circ$	0.2°
I	310	0.01°	$\pm 0.02^\circ$	$0.01 \pm 0.02^\circ$	0.2°

Совместно с европейскими исследователями в 2013 г. [26] было проведено сопоставление значений компонентной модели с первыми аэромагнитными измерениями магнитного склонения и вертикальной компоненты, выполненными на дирижабле «Граф Цеппелин» в июле 1931 г. Арктический полет дирижабля был выполнен в рамках международного проекта, в котором приняли участие немецкие, советские, американские и шведские ученые. Полет дирижабля выполнен вдоль протяженного маршрута Берлин – Ленинград – Архангельск – Земля Франца-Иосифа – Северная Земля – п-ов Таймыр – Новая Земля – Архангельск–Берлин.

На участке полета Земля Франца-Иосифа—Северная Земля были зафиксированы локальные аномалии магнитного склонения, достигающие значений $8\text{--}12^\circ$. Подробный анализ геомагнитных измерений, проведенных в Арктическом полете на дирижабле «Граф Цеппелин» привел к выводу, что реализация идеи Ф. Нансена по использованию дирижаблей для исследования в арктических условиях оказалась плодотворной [26].

Особый интерес представляют спутниковые измерения в околоземном пространстве. По измерениям на спутнике CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) опубликованы редукции карт магнитных аномалий для высот 100 и 400 км [27—29]. Проведенный сравнительный анализ модуля вектора и вертикальной компоненты МПЗ, измеренных на спутнике CHAMP и рассчитанных по модели магнитных аномалий, показал их хорошую сходимость для высот 100 и 400 км.

Статистическая оценка расхождений между магнитными аномалиями по данным спутника и модели для высот 100 и 400 км показала, что они подчинены нормальному закону распределения. Большой объем выборки ($N = 64\,619$ значений в диапазоне долгот от $\pm 180^\circ$ для интервала широт $\pm 87^\circ$) позволил вычислить оценки с применением критерия Стьюдента с доверительной вероятностью 95 %.

На высоте 100 км среднеарифметическое значение расхождений аномалий модуля составило 0.36 нТл, доверительный интервал ± 0.12 нТл, среднеквадратическое отклонение ± 16 нТл. Для аномалий вертикальной компоненты это соответственно: 0.03 нТл, ± 0.03 нТл и ± 17.8 нТл. Амплитуды аномалий модуля вектора и вертикальной компоненты МПЗ на высоте 100 км изменяются в диапазоне ± 200 нТл (рис. 2, б). На высоте 400 км среднеарифметическое значение расхождений аномалий модуля МПЗ по данным спутника и модели составило 1.50 нТл, доверительный интервал ± 0.05 нТл, среднеквадратическое отклонение ± 6.8 нТл. Амплитуда аномалий модуля вектора МПЗ на этой высоте изменяется в диапазоне ± 20 нТл.

Таким образом, статистическая оценка расхождений аномалий модуля вектора и вертикальной компоненты МПЗ по данным спутника и модели для высоты 100 км, показала, что среднеквадратическое отклонение составляет $\pm 16\text{--}18$ нТл. Однако в настоящее время известно, что на высотах около 100—120 км возникает ионосферная токовая система, ответственная за геомагнитные возмущения амплитудой 100—2000 нТл (магнитные бури, суббури и геомагнитные пульсации). В связи с этим наблюдаемые значения МПЗ в этом диапазоне высот на спутниках представительны только в отсутствии существенных геомагнитных возмущений и с соответствующей компенсацией по моделям [30]. Карты, рассчитанные по компонентной модели МПЗ (рис. 2, б, в), могут отражать картину распределения аномалий постоянного магнитного поля на любой высоте в верхнем полупространстве без помех, обусловленных геомагнитными возмущениями.

Особенности пространственного распределения магнитных аномалий в районах внезапного появления источников мощных токовых систем. Особое прикладное значение имеет информация о мощных токовых системах на уровне океана, в атмосфере и ионосфере, создающих дополнительные помехи для магнитной навигации в Мировом океане. Одним из таких масштабных процессов являются грозовые образования типа «спрайт», которые пока мало изучены. «Спрайты» сопровождаются интенсивными всплесками рентгеновского излучения, что создает дополнительную угрозу при запусках и приводнении космических аппаратов. В интервале высот от уровня океана до 60—90 км в атмосфере существенно увеличивается интенсивность грозовых явлений, что представляет опасность для космической навигации. Высота образования «обычных» молний и грозовых явлений — не выше 16 км. Спрайты — молнии разных форм и цветов — появляются через десятые доли секунды после удара очень сильной молнии и длятся менее 100 мс. Они распространяются одновременно вверх и вниз. Воронкообразные вспышки света длительностью несколько миллисекунд возникают выше 30 км над облаками. Высота спрайта достигает 60—90 км, создавая воронку размером до 100 км в диаметре [31].

Известны некоторые регионы наибольшей грозовой активности. Спрайты локализованы в Северной Америке (Аляска, Скалистые горы и Оклахома-Сити), в Южной Америке (Бразилия), Африке и Юго-восточной Азии (Индонезия). Большое количество спрайтов наблюдалось вблизи антарктической станции Сева. Все эти районы, над которыми развиваются мощные токовые системы на уровне океана, в атмосфере и ионосфере характеризуются интенсивными магнитными аномалиями постоянного МПЗ, источники которых находятся в океанической и континентальной земной коре. Эти аномалии проявляются до высот 100—400 км. Расчеты по пространственной модели показывают, что в зонах локализации грозовой активности на высоте $h = 30$ км амплитуда аномалий модуля вектора МПЗ достигает значений 400—2000 нТл, а вертикальной и горизонтальной компонент — 600—2000 нТл, и 700—900 нТл соответственно. На высотах 50—60 км амплитуда аномалий модуля вектора и вертикальной компоненты Z МПЗ уменьшается до 300—1100 нТл, горизонтальной — до 500—600 нТл. Вертикальный градиент Z компоненты составляет на $h = 30$ км 30 нТл/км, а на $h = 50$ км — 20 нТл/км. Это превышает средний уровень вертикального градиента в спокойных районах почти в 5 раз.

Возможно, что эти явления могут быть приурочены к интенсивным магнитным аномалиям древних щитов, имеющих глубинные корни, преобразованные в результате процессов регионального метаморфизма докембрийской коры [32, 33], и аномалиям зон субдукции, четко выраженным вплоть до высоты 400 км. Исследование пространственного распределения магнитных аномалий в диапазоне высот 0—100 км позволяет выявить наиболее вероятные районы внезапного появления источников этих мощных токовых систем.

В качестве примера активного проявления спрайтов выполнен расчет магнитных аномалий компонент по компонентной модели для района в северной части Тихоокеанского кольцевого пояса (Алеутские острова и полуостров Аляска) (рис. 3, см.вклейку). Магнитные аномалии модуля вектора и горизонтальной компоненты H МПЗ на высоте 60 км, приуроченные к Алеутскому желобу (область зоны субдукции), имеют амплитуды 100—200 нТл, а на высоте 100 км — около 60 нТл. Аномалии продолжаются в северо-восточном направлении на территорию Аляски, где неоднократно фиксировались спрайты. Аналогичные магнитные аномалии наблюдаются на полуострове Камчатка и в районе Курило-Камчатского глубоководного желоба, что необходимо учитывать в космической навигации и мониторинге космической погоды.

Исследование глубинного строения земной коры на базе компонентной модели. На основе пространственной модели компонент вектора индукции МПЗ проведены фундаментальные, поисковые и прикладные научные исследования глубинного строения земной коры и мантии. По сравнению с модульными измерениями, векторные данные содержат гораздо больше информации о магнитных неоднородностях строения литосферы. Они позволяют подойти к решению вопроса о намагниченности и свойствах источников региональных и крупных региональных аномалий, несущих информацию о физическом состоянии древнейших блоков континентальной и молодой океанической коры.

В СПбФ ИЗМИРАН разработаны также геомагнитные технологии выявления слабомагнитных флюидных систем и флюидоподводящих каналов подпитки нефтегазоносных бассейнов [34—40]. На основе опыта работы в регионах с доказанной нефтегазоносностью сформулированы критерии прогноза долгоживущих месторождений, обусловленные особенностями структуры аномалий магнитного поля в этих областях. Анализ расчетных значений по предложенной модели, учитывающей морские геомагнитные измерения Z -компоненты, позволил выявить характер распределения проницаемых зон в земной коре районов крупных газовых и нефтяных залежей Северного (рис. 4, см.вклейку), Норвежского и Средиземного морей [5, 38—43]. По материалам компонентной гидромагнитной съемки на акватории Северного моря исследованы особенности локализации возобновляемых месторождений углеводородов [38, 43].

Геомагнитный метод прогноза долгоживущих месторождений нефти и газа опробован и дал положительные результаты в нефтегазоносных бассейнах России (Поволжья, Башкирии, Кубани, Сибири и др.), а также в Баренцевом, Каспийском, Северном, Средиземном и Беринговом морях [17, 37—40, 42, 43]. Наибольший практический интерес этот метод представляет для труднодоступных областей Арктики и его континентальной окраины [15, 17, 37, 44—47].

Исследования неоднородностей глубинного строения Северного Ледовитого океана в районе хребтов Гаккеля, Альфа и Ломоносова по компонентной модели, приземным измерениям модуля магнитных

аномалий и по спутниковым данным (CHAMP) показали, что литосферные источники аномалий отчетливо проявляются в магнитных измерениях вплоть до высот около 400 км [46, 47]. Хребет Альфа является одной из крупнейших магматических провинций мира и создает магнитные аномалии более 100—120 нТл на высоте 100 км и более 10 нТл на 400 км. По данным аэромагнитных съемок (высота около 500 м), максимальные значения магнитных аномалий приурочены к хребту Альфа к интервалу широт 84—85N, где они достигают значений 800—1500 нТл.

Магнитные и плотностные разрезы позволили оценить мощность и свойства неоднородностей фундамента хребтов Гаккеля, Ломоносова и Альфа в земной коре и верхней мантии.

Глубинные разрезы через Ледовитый океан по аэромагнитным измерениям подчеркивают отличительные особенности строения литосферы хребтов Гаккеля и Альфа (рис. 5, см.вклейку). По анализу приземных данных по компонентной модели наиболее магнитные слои земной коры хребта Альфа находятся в интервале глубин 10—20 км [45—47]. В осевой части хребта Альфа (черная стрелка, рис. 5) расположены горизонтально-слоистые магнитные неоднородности, погружающиеся до глубины около 30 км. В верхней мантии вся площадь хребта подстилается магнитной неоднородностью, расположенной на глубинах 40—60 км. Магнитные мантийные неоднородности хребта Альфа приурочены к зоне пониженной плотности на глубине около 30 км. На основе проведенных исследований и анализа по компонентной модели [34—39] возможен прогноз долгоживущих месторождений нефти и газа в труднодоступных областях Арктики.

На базе исследований магнитных аномалий по компонентной модели для щитов Европы (Балтийского и Украинского) (рис. 1—3, 6, 7), Северной и южной Америки, Африки и Австралии (рис. 2, б, в) выполнен анализ обширных геолого-геофизических данных, опирающийся на концепцию эволюции раннедокембрийской земной коры [32—33, 48]. В результате геолого-геофизических исследований на основе вещественных преобразований древней коры континентов выделены блоки, в которых существуют намагниченные «магнетитовые зоны», расположенные на границе «гранулитобазитового» и гранитного слоев. По данным сверхглубоких скважин «магнетитовая зона» сложена преобладающе кварц-магнетитовыми и плагиоклаз-кварц магнетитовыми породами [32]. Глубинные «магнетитовые зоны» приурочены к наиболее богатым месторождениям железа в мире, в частности, месторождениям железистых кварцитов поясовых тектонических структур и, вероятнее всего, «магнетитовые зоны» являются источником их формирования.

Переходная зона от Азиатского континента к Тихому океану по границе континент-океан в пределах Тихоокеанского кольцевого пояса отличается высокой вулканической и сейсмической активностью (рис. 3, в). По магнитным аномалиям модуля, вертикальной и горизонтальной компонентам МПЗ, полученным по компонентной модели, исследовано глубинное строение сейсмофокальных зон Курило-Камчатского желоба, которое проявляется интенсивными аномалиями вблизи поверхности Земли и на высотах 60, 100 и 400 км. Магнитные аномалии «магнитоактивной зоны», обусловленной намагниченными погружающимися слоями в области пониженных температур мантии в зоне субдукции, четко проявляются в компонентах вектора индукции МПЗ (рис. 2, б, в; рис. 3).

Возможно, что и эта «магнитоактивная зона» была образована в докембрии, магма которого была сильно обогащена минералами железа. Процесс эволюции древней земной коры мог обусловить дальнейшее развитие поясовых структур переходной зоны Азиатский континент — Тихий океан.

Исследование гидротермальных зон. Геолого-геофизическая интерпретация магнитных аномалий МПЗ, рассчитанных по компонентной модели, показала перспективы миграции флюидного потока в Западной Европе, который может обеспечить долговременную подпитку гидротермальных месторождений в ряде европейских стран.

В настоящее время возросло внимание к использованию геотермальной энергии как альтернативному источнику тепла и электроэнергии. В СПбФ ИЗМИРАН разработан оригинальный комплекс электромагнитного метода поиска глубинных флюидных систем и геотермальных месторождений [15, 37, 39, 49, 50]. Получены региональные признаки для выявления месторождений геотермальных вод в виде крупных глубинных зон устойчивой флюидной подпитки и вертикальных треков повышенной проводимости по материалам совместной интерпретации аномального МПЗ и данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

На основе геолого-геофизической интерпретации магнитных аномалий Z-компоненты МПЗ, рассчитанных по компонентной модели, выявлены особенности глубинного строения геотермальных зон

Центральной Европы [15]. Оценены перспективы миграции флюидного потока, обеспечивающего долговременную подпитку термальных вод на территориях Франции, Германии, Швейцарии, Австрии и Венгрии (рис. 6).

Центральная Европа приурочена к области глубоких минимумов спутниковых магнитных аномалий на высотах 100 и 400 км. Глубокий минимум геомагнитного поля на высоте около 100 км вытянут в северо-западном направлении по линии Сербия—Германия (рис. 7). Центральная часть минимума падает на территории Венгрии, Австрии, Словакии и Чехии.

С целью исследования глубинного строения этих зон минимумов по приземным магнитным аномалиям (ΔZ) построена система широтных профилей, на которых выполнены геомагнитные разрезы земной коры [50]. Пути продвижения горячего флюидного потока отражаются на глубинных геомагнитных разрезах в виде размагниченных каналов в земной коре и треков, восходящих к дневной поверхности (рис. 6).

Комплексирование геомагнитного метода с данными МТЗ открывает новые возможности для поиска геотермальных зон с подземными резервуарами большой емкости. На рис. 7 показано местоположение геомагнитных обсерваторий Европы вблизи минимумов аномалий модуля МПЗ, выделенных на высотах 100 и 400 км. С целью совместных исследований глубинного строения геотермальных зон с электромагнитными методами построены широтные профили через геомагнитные обсерватории Grocka (GCK), Castello Nesino (CTS), Tihany (THY), Chambon-la-Forêt (CLF), Budkov (BDV), Manhay (MAB) (рис. 7). По системе широтных профилей выполнены геомагнитные разрезы земной коры (рис. 6). В результате анализа выявлены мощные проницаемые слабوماгнитные зоны повышенной проводимости в средней и нижней коре, выделенные по геомагнитным разрезам на глубинах 20—35 км. Это позволяет предположить, что они являются реологически ослабленными линзами, перспективными на поиски подземных гидротермальных источников большой емкости.

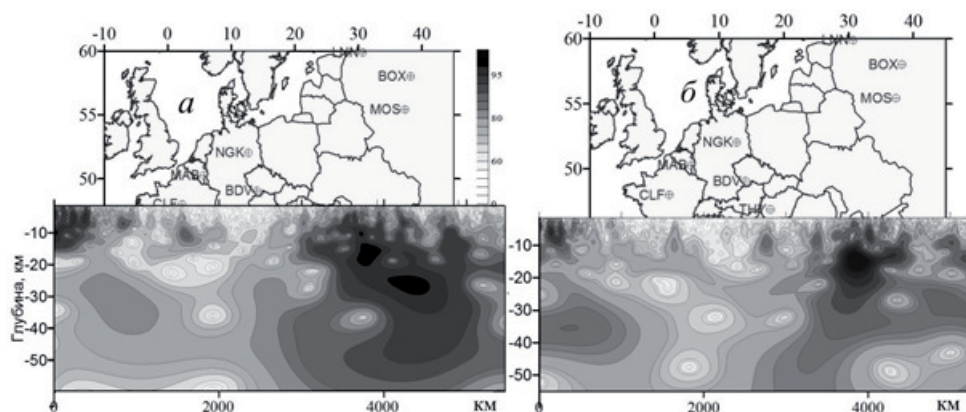


Рис. 6. Геомагнитные разрезы геотермальных зон Центральной Европы.

a — Франции, юга Германии, Австрии, Венгрии; *б* — юга Франции, Швейцарии, Австрии, Венгрии.

Шкала намагниченности в отн. ед. Трехбуквенными кодами даны коды геомагнитных обсерваторий по системе МАГА.

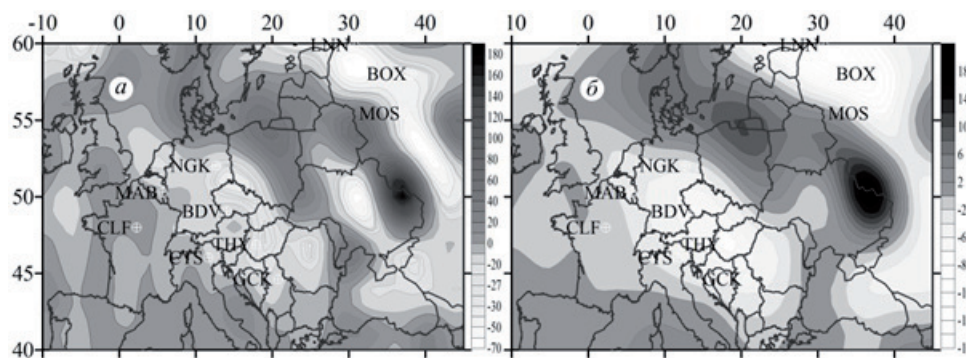


Рис. 7. Положение минимумов магнитных аномалий (ΔT) в Западной Европе.

a — $h = 100$ км; *б* — $h = 400$ км. Шкалы амплитуд аномалий в нТл. Трехбуквенными кодами даны коды геомагнитных обсерваторий по системе МАГА.

Таким образом, на основе интерпретации расчетных значений по пространственной компонентной модели выделены области, четко проявившиеся глубокими минимумами на высотах 100 и 400 км. Возможно, что они обусловлены наличием проницаемых зон в коре и мантии, выделенных на глубинных геофизических разрезах и по результатам интерпретации данных МТЗ (рис. 6) [50].

По материалам аэромагнитных и гидромагнитных съемок исследованы особенности структуры МПЗ океанов и континентов и создана основа пространственной модели компонент вектора индукции МПЗ в интервале высот 0—400 км. На базе предлагаемой модели может быть построено следующее поколение магнитных карт Мирового океана и околоземного пространства для целей магнитной навигации и изучения глубинного строения литосферы Земли. Проведенные статистические оценки расхождений расчетных значений по модели с наземными измерениями компонент МПЗ на Мировой сети геомагнитных обсерваторий и с высотными картами, построенными для $h = 100$ и 400 км по независимым измерениям на борту спутника СНАМР, показали хорошее соответствие расчетных и измеренных значений.

По результатам анализа магнитных аномалий, вычисленных по компонентной модели МПЗ, выявлены:

— свойства земной коры в районах газовых и нефтяных месторождений, что расширяет и удешевляет возможности поиска долгоживущих месторождений нефти и газа, в том числе в труднодоступных областях Арктики;

— особенности глубинного строения щитов древних континентов и зон субдукции в переходной области континент-океан для Тихоокеанского кольцевого пояса.

Литература

1. Иванов М. М. Изучение магнитного поля Земли по результатам измерений на шхуне «Заря» // Вестник АН. 1973. № 10. С. 38—48.
2. Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984. 232 с.
3. Копытенко Ю. А., Касьяненко Л. Г., Колесова В. И., Эфендиева М. А. Развитие фундаментальных и прикладных геомагнитных исследований учёными Ленинграда и Санкт-Петербурга в интересах военно-морского флота России // Наука Санкт-Петербурга и морская мощь России. СПб.: Наука, 2000. С. 346—372.
4. Карасик А. М., Почтарев В. И., Цуцкарев Б. М. Морские геомагнитные исследования на НИС «Заря». М.: Наука, 1986. 183 с.
5. Баткова Л. А., Боярских В. Г., Демина И. М. Комплексная база данных компонент геомагнитного поля на акватории океанов по результатам съемок, выполненных на немагнитной шхуне «Заря» // Геомагнетизм и Аэрономия. 2007. Т. 47. С. 571—576.
6. Колесова В. И., Петрова А. А., Пушков А. Н. Задачи исследования геомагнитного поля Мирового океана на базе специализированной системы накопления, хранения и обработки информации // Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований. М.: Наука, 1980. С. 92—99.
7. Колесова В. И. Аналитические методы магнитной картографии. М.: Наука, 1986. 223 с.
8. Колесова В. И., Черкаева Е. А. Вычисление компонент аномального геомагнитного поля по данным модульных съемок при переменном направлении вектора главного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 6. С. 1036—1037.
9. Колесова В. И., Петрова А. А., Почтарев В. И., Шленская Т. А., Черкаева Е. А. Построение числовой векторной пространственной модели стационарного геомагнитного поля // Материалы III съезда по геомагнетизму. Ялта, 1986. С. 312—316.
10. Колесова В. И., Черкаева Е. А. Вычисление компонент векторного аномального геомагнитного поля по модульным данным, препринт № 46 (735), 1987. М.: ИЗМИРАН. 24 с.
11. Колесова В. И., Эфендиева М. А. Метод вычисления магнитного склонения по модульным данным // Тр. 4-ой Российской научно-технической конференции «Современное состояние проблемы навигации и океанографии», т. 2. СПб.: 2001. С. 126—129.
12. Копытенко Ю. А., Колесова В. И., Гурьев И. С. Исследование целесообразности комплексного использования составляющих вектора индукции магнитного поля Земли и его модуля для целей магнитной навигации // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии». СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2007. С. 11—18.
13. Колесова В. И. Натурное апробирование метода вычисления компонент аномального магнитного поля по модульной информации и перспективы его использования в магнитной картографии // Сборник трудов Всерос. н-т конф. Вып. 3. СПб.: изд-во ВКА им. А. Ф. Можайского, 2004. С. 55—62.
14. Korhonen J. et al. Magnetic anomaly map of the world, scale 1:50,000,000, 1st ed., Geol. Surv. of Finland, Helsinki. 2007.
15. 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.
16. Petrova A. A., Kolesova V. I. Study of spectral characteristics of the geomagnetic field region with different types of the Earth's crust // Verof. des Zentralinstituts fur Physik der Erde. 1981. N 70, V. 1. P. 1200—1209.

17. Литвинова Т. П., Петрова А. А. Проявление зон нефтегазогенерации Берингова моря в приземных магнитных аномалиях и аномалиях спутника Чамп // Региональная геология и металлогения. № 54. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. С. 17—24.
18. Litvinova T., Petrova A. The analysis of magnetic anomalies from WDMAM 2007 and the anomalous magnetic field in the south of eastern Siberia // EGU General Assembly 2011. Geophysical Research Abstracts, V. 13. Austria, Vienna, 2011. EGU2011-14062.
19. Litvinova T., Petrova A. Geological interpretation of the magnetic anomalies from WDMAM 2007 and from observation in the Barents Sea region // EGU General Assembly 2011. Geophysical Research Abstracts, V. 13. Austria, Vienna, 2011. EGU2011-14070.
20. Petrova A., Petrishchev M. Study of the magnetic anomalies from WDMAM 2007 in the geothermal area of alpine folding (Italy and Tyrrhenian Sea). EGU General Assembly 2011. Geophysical Research Abstracts, V. 13. Austria, Vienna, 2011. EGU2011-14065.
21. Дерффель К. Статистика в аналитической химии. М.: Мир, 1994. 268 с.
22. Козлов М. Г. Метрология и стандартизация: Учебник. М., СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2001. 372 с.
23. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. М.: Высшая школа, 2002. 348 с.
24. Куприенко Н. В., Пономарева О. А., Тихонов Д. В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 138 с.
25. Норин В. А. Метрология, стандартизация и сертификация. СПб.: СПбГАСУ, 2010. 38 с.
26. Rasporov O. M., Sokolov S. N., Demina I. M., Pellinen R., Petrova A. A. The first aeromagnetic survey in the Arctic: results of the Graf Zeppelin airship flight of 1931 // History of Geo- and Space Sciences. 2013. 4. P. 35—46.
27. Manda M., Thebaud E. The Changing Faces of the Earth's Magnetic Field. Paris, 2007. 49 p.
28. Maus S., Sazonova T. National Geophysical Data Center candidate for the World Digital Magnetic Anomaly Map // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, an Electronic Journal of the Earth Sciences Technical Brief. 2007. V. 8, N 6. P. 1—10.
29. Thebaud E. et al. The magnetic field of the Earth's lithosphere // Space Science Reviews. 2010. V. 155. P. 95—127.
30. Poedjono B., Maus S., Manoj C. Effective Monitoring of Auroral Electrojet Disturbances to Enable Accurate Wellbore Placement in the Arctic // OTC 1726418, 2014.
31. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. Natural electromagnetic pulses in the ELF range // Geophysical Research Letters 25. 1998. doi: 10.1029/98GL01699.
32. Наливкина Э. Б. Эволюция раннедокембрийской земной коры. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 204 с.
33. Наливкина Э. Б. Критерии рудоносности раннедокембрийской земной коры континентов. СПб.: изд. ВСЕГЕИ, 2015. 79 с.
34. Петрова А. А. Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля: Автореф. Дис.: канд. физ.-мат. наук. М.: ИЗМИРАН, 1976. 25 с.
35. Петрова А. А. Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля // Геофизический сборник АН УССР. 1977. Вып. 76. С. 55—66.
36. Петрова А. А., Колесова В. И. Способ геофизической разведки. А.С. 1289232 СССР // Б.И. 1986. № 15. С. 45.
37. 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.
38. Petrova A., Demina I., Petrishchev M. Detection of the deep approach fluid channels in the oil-and-gas basins using the geomagnetic data (North and Norwegian Seas) // Proc. 10th ICAM. Trondheim, Norway, 2011. P. 523—529.
39. Петрова А. А., Петрищев М. С. Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1, Вып. 17. С. 23—33.
40. Мавричев В. Г., Петрова А. А. Крупномасштабная аэромагнитная съемка осадочных бассейнов // Разведка и охрана недр. 2001. № 9. С. 14—18.
41. Касьяненко Л. Г., Лизунова М. М., Голуб Д. П. Гидромагнитная трехкомпонентная съемка Северного моря на НИС «Заря» и ее картографическое представление. Препринт. М.: 1982. 18 с.
42. Петрова А. А., Демина И. М. Строение нефтегазоносных зон Северного моря по магнитометрическим данным // Материалы XVIII Международной Научной Конференции (Школы) по морской геологии. Геология морей и океанов. М.: 2009. Т. II. С. 82—86.
43. Petrova A. A., Demina I. M. Features of the Earth's crust structure of oil-gas pools of the North Sea on the base of magnetic data // Proc. 4th St.-Petersburg International Conference & Exhibition. 2010. Saint Petersburg, Russia. P. 143.
44. Petrova A. A., Turbin Y. A. Results of interpretation dates of aeromagnetic surveys by SPAN-method on the support profile Kola-ZFI // EAGE Conference and Technical Exhibition, Extand. Abstr. Book. V. 1. Zeist, 1997. P. 190—193.
45. 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.
46. Litvinova T., Petrova A. Lithospheric sources of magnetic anomalies of the Aldan shield and Alpha Ridge // Geophysical Research Abstracts. V. 15. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2013. EGU2013-2578.
47. Litvinova T., Petrova A. Features of the structure of the lithosphere of the Arctic Ocean near the Gakkel Ridge, the Alpha and Lomonosov // Proceedings of the Geological Society of Norway. 2014. N 2. P. 31—34.
48. Наливкина Э. Б. Геологические разрезы раннедокембрийской земной коры Ангаро-Канского блока Енисейского кряжа. Красноярск. 2013. 207 с.
49. Petrishchev M., Petrova A., Kopytenko Yu. et al. Electromagnetic imaging of crustal geothermal systems within the Northern Andes // Abstract Volume of XII th Scientific Assembly of IAGA. Merida, Mexico, 2013. P. 101.
50. Litvinova T., Petrova A., Petrishchev M. Electromagnetic imaging of lithosphere permeable zones // Geophysical Research Abstracts. V. 16. EGU General Assembly, Austria, Vienna, 2014. EGU2014-8938.

Статья поступила в редакцию 23.01.2015 г.

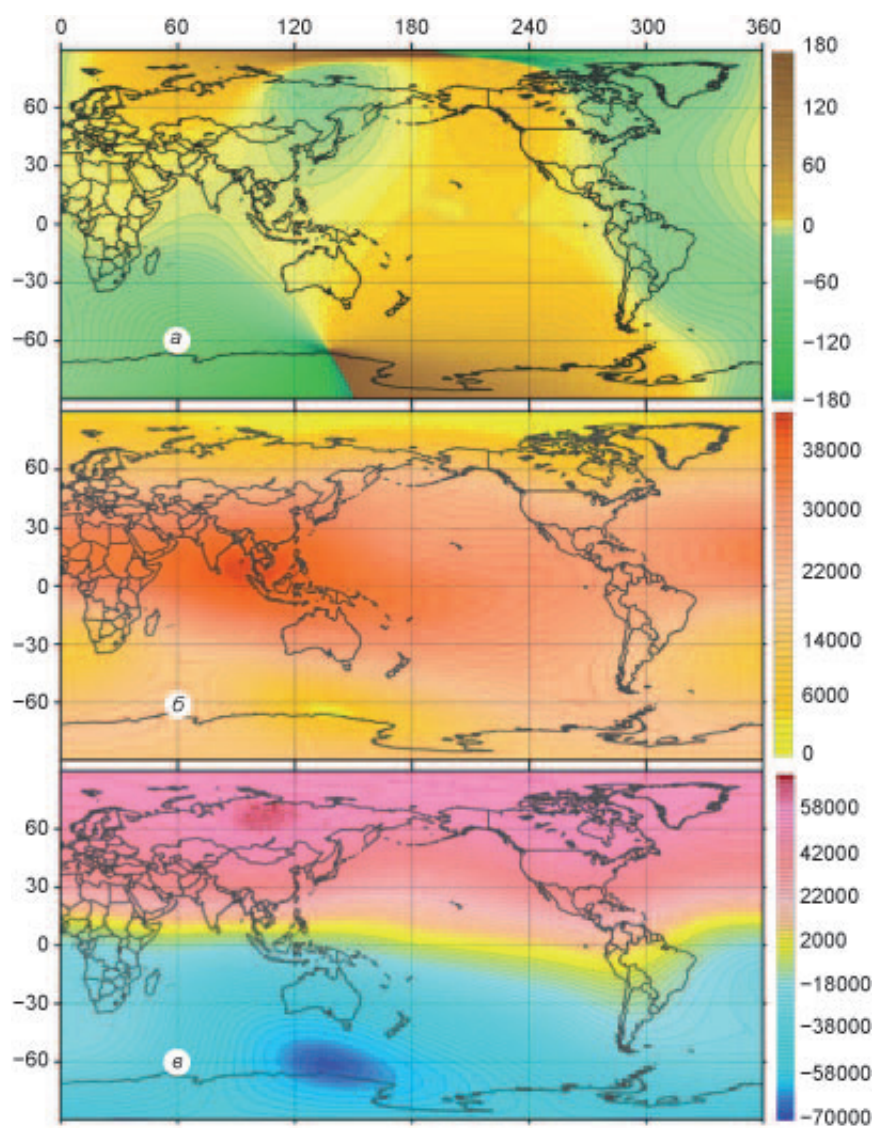


Рис. 1. Мировая карта магнитного склонения D (а) (шкала в градусах), горизонтальной H (б) и вертикальной Z (в) компонент (шкала в нТл) МПЗ.

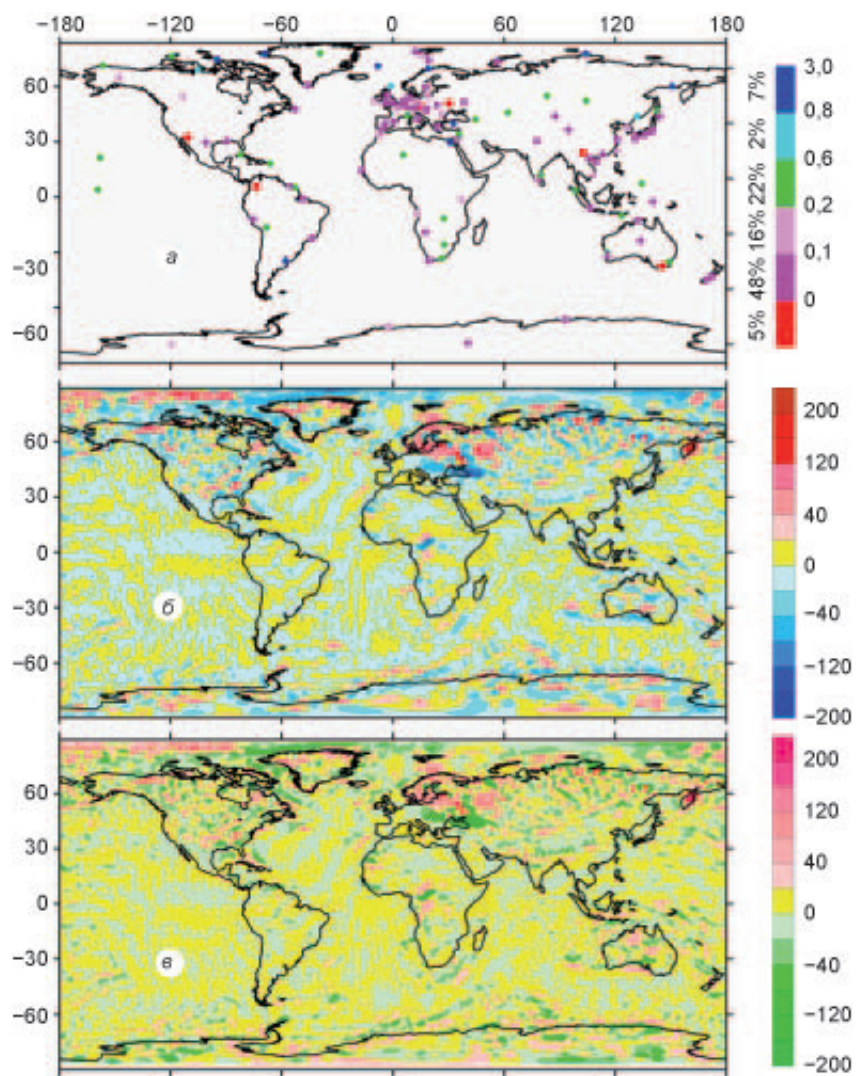


Рис. 2. Расхождение расчетных значений магнитного склонения D с данными обсерваторий (градусы) (а); расчетные значения магнитных аномалий модуля вектора $(\Delta T)a$ (б) и вертикальной компоненты $(\Delta Z)a$ (в) МПЗ для высоты 100 км (нТл).

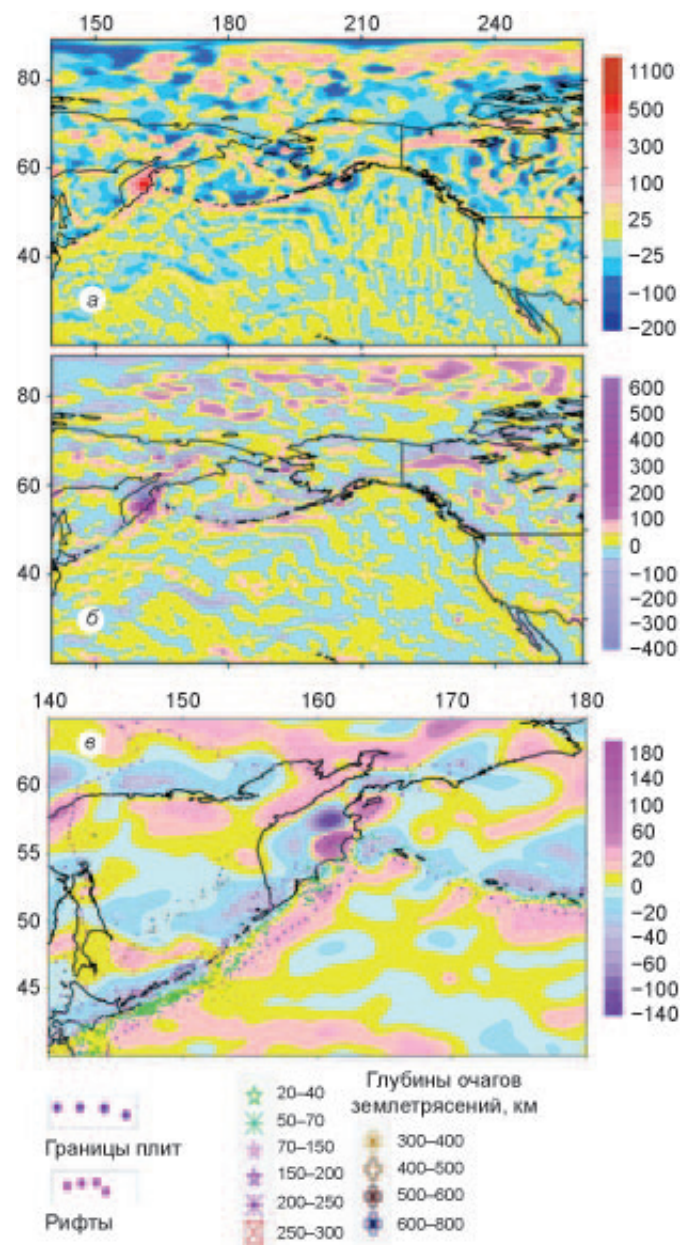


Рис. 3. Магнитные аномалии модуля вектора (ΔT)а (а), вертикальной компоненты (ΔZ)а (б) на высоте 60 км и горизонтальной компоненты (ΔH)а МПЗ на высоте 100 км в зоне глубинных землетрясений Курило-Камчатского глубоководного желоба (нТл).

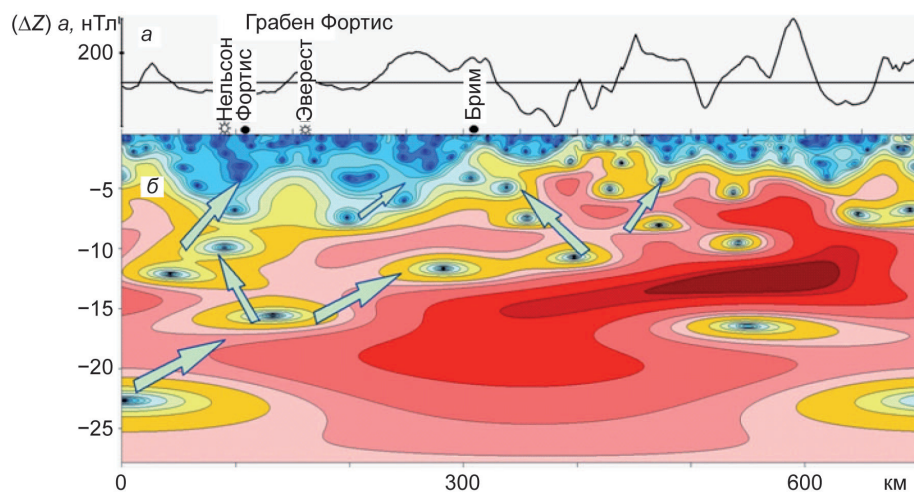


Рис. 4. Разрез земной коры Северного моря в районе известных месторождений углеводорода.
 a — аномалии $(\Delta Z)a$; b — геомагнитный разрез. Шкала намагниченности в отн. ед.

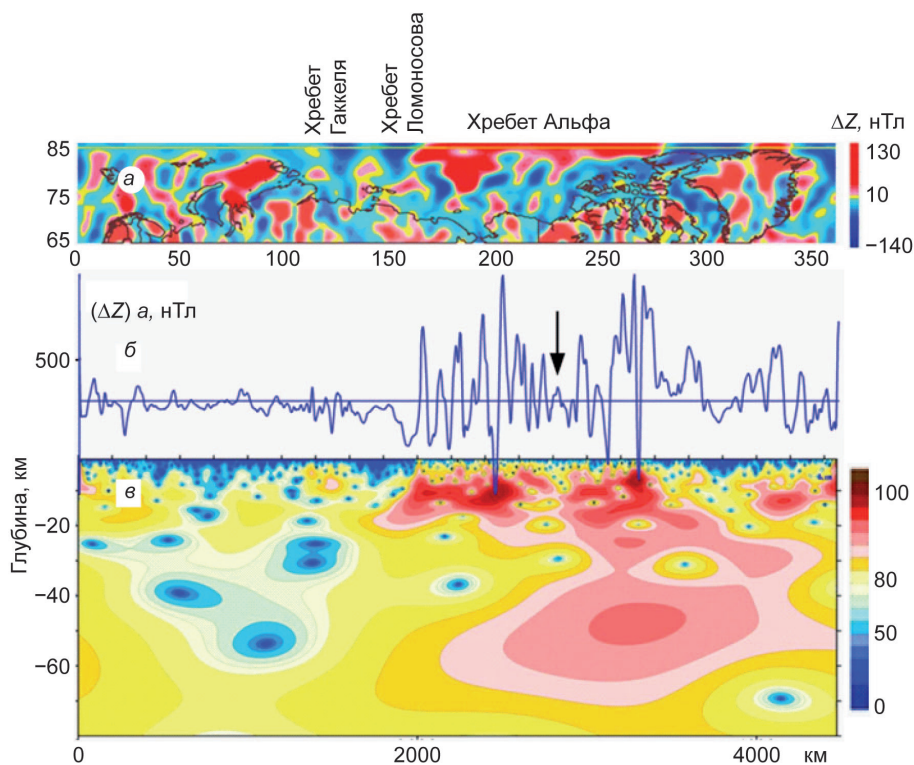


Рис. 5. Аномалии ΔZ ($h = 100$ км) (a); аномалии $(\Delta T)a$ ($h = 500$ м) (b);
 геомагнитный разрез литосферы хребтов Гаккеля, Ломоносова и Альфа (c).
 Шкала намагниченности в отн. ед.