

УДК 550.312:551.334:551.24

© В. И. Богданов, Т. И. Малова

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН
malova.ti@yandex.ru

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ИЗОСТАЗИИ И МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ ТРЕЩИНОВАТОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ КОНТИНЕНТОВ И ОКЕАНОВ

Статья поступила в редакцию 22.06.2015 г., после доработки 30.05.2016 г.

Изостатические представления зарождались в рамках контракционной гипотезы Эли де Бомона, опиравшейся на представления Канта—Лапласа, первоначально расплавленную Землю и на процессы ее постепенного остывания и сжатия. Формировавшаяся в виде корки земная кора постепенно наращивала свою толщину, сминаясь в складки и находясь в гидростатическом равновесии с подстилающим ее субстратом. В процессе триангуляционных работ XVIII—XIX вв. были зафиксированы отличия измеренных уклонений отвеса вблизи горных массивов от расчетных оценок, что позволило Дж. Г. Пратту и Дж. Б. Эри предположить существование глубинных компенсационных масс. К. Е. Даттон, предложивший термин «изостазия», рассмотрел широкий круг геологических задач. Отличие измеренных уклонений отвеса объясняется известным в гравиметрии влиянием «соседних» масс, сформировавших Северо-Атлантическую и Индийскую планетарные аномалии геоида, а также реальным макроуплотнением горных массивов, не выявляемым при изучении плотности и пористости небольших образцов пород. Современные затруднения концепции связаны с объяснением глобальных перемещений астеносферных масс при планетарной эвстазии, гидро- и гляциоизостазии на вращающейся Земле, а также с объяснением отрицательного результата гравиметрического эксперимента по проверке изостатического механизма современного «всплывания» Фенноскандии. Реакцию земной поверхности и ложа морей и океанов на изменения внешних нагрузок принято рассматривать в рамках единого процесса поддержания изостатического равновесия. Этим представлениям противоречат факты «высокой коровой чувствительности» даже к небольшим осцилляциям внешних нагрузок, повсеместная трещиноватость земной коры, и масштабные зависимости ее физических и деформационных свойств от размеров области приложения нагрузок. Предполагаются два механизма такой реакции коры: «сжатие-расширение» макропоровых пространств в слое 0—10 км и, в соответствии с результатами сверхглубинного бурения на Кольском полуострове, — фазовый механизм на больших глубинах. Обсуждаются пути экспериментального изучения этих явлений в областях аномальных природных и техногенных нагрузок.

Ключевые слова: концепция изостазии, трещиноватая кора, плотностная модель, вязко-эластические свойства, масштабные эффекты.

V. I. Bogdanov, T. I. Malova

Saint-Petersburg Department of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia

THE PROBLEMS OF CONTEMPORARY CONCEPT OF ISOSTASY AND SCALE EFFECTS FOR FRACTURED EARTH'S CRUST OF CONTINENTS AND OCEANS

Received 22.06.2015, in final from 30.05.2016.

Isostatic ideas appeared within the framework of E. de Beaumont's contractional hypothesis, which based on views of Kant–Laplace as well as on ideas of primarily smelted Earth and processes of its gradual cooling and compression. Formed as a shell Earth's crust gradually increased the thickness with clenching into the folds and stay in hydrostatical balance with the underlying substratum. During triangulations of XVIII—XIX centuries differences between the measured deflection of the vertical near mountain ranges and estimates were fixated, so J. Pratt and G. B. Airy had an opportunity to suggest the existence of deep compensating masses. C. E. Dutton, the author of the term «isostasy», considered the wide range of geological problems. Distinction of measured deflection of the vertical is explained by known in gravimetry effect of «neighbor» masses, which formed the North-Atlantic and Indian planetary anomalies of geoid, as well as by

Ссылка для цитирования: Богданов В. И., Малова Т. И. Проблемы современной концепции изостазии и масштабные эффекты трещиноватой земной коры континентов и океанов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 3. С. 3—17.

For citation: Bogdanov V. I., Malova T. I. The problems of contemporary concept of isostasy and scale effects for fractured Earth's crust of continents and oceans. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 3, 3—17.

real «macrodesdensity» of rock massifs, which is not detected by surveying of density and porosity of small samples of rocks. Modern difficulties with the concept are connected with the explanation of global displacements of asthenosphere masses in planetary eustasy, hydro- and glaciostasy on the rotating Earth as well as the explanation of negative result of gravimetrical experiment for the verification of Fennoscandian «floating» isostatic mechanism. The reaction of Earth surface and oceans' bed to the changes of external loads is usually considered according the unified process of maintaining the isostatic equilibrium. These hypotheses are contradicted with the facts of «high crustal sensitivity» even to small oscillations of external loads as well as total fracturing of the Earth's crust and scale additions of its physical and deformation properties from the size of the application area loads. Two mechanisms of the crust's reaction are suggested: «compression–dilatation» of macropored areas in the layer of 0–10 km and, according to the results of ultradeep boring on the Kola Peninsula, — the phase mechanism at great depths. The ways of experimental research of such effects in the areas of abnormal natural and anthropogenic stresses are discussed.

Key words: concept of isostasy, fractured crust, density model, viscous-elastic properties, scale effects.

В основе исключительной по своей простоте и привлекательности концепции изостазии, опирающейся на гипотезы гидро-, гляцио- и литоизостазии, лежит не менее простой и привлекательный закон гидростатического равновесия «плавающих» на менее вязком субстрате блоков земной коры. Эти представления зарождались в эпоху контракционной геотектонической концепции, когда считалось, что земная кора, формировавшаяся в виде корки на поверхности расплавленной мантии, постепенно наращивала свою толщину, смятая в процессе охлаждения и сжатия Земли.

В XX в. были предприняты попытки распространения закона гидростатического равновесия на планетарные масштабы без учета вращения Земли, высказано предположение о стремлении земной коры к состоянию минимума потенциальной энергии; рассмотрена проблема взаимосвязи тектонических движений и магматизма Земли на основе вариационного принципа наименьшего действия. Развитие идей изостазии и их критический анализ изложены в XX в. в работах А. Вегенера, А. Д. Архангельского, Б. Гутенберга, Е. Н. Люстиха, Г. Джеффриса, Б. А. Андреева, Т. Цубои, И. Г. Клушина, С. А. Евтеева, Г. И. Лазукова, В. А. Магницкого, Ф. Стейси, Н.-А. Мернера, Е. В. Артюшкова, Н. И. Николаева.

Во многих из перечисленных и в некоторых публикациях XXI в. отмечалось, что концепция изостазии по-прежнему преуменьшает роль тектонического фактора в развитии ледниковых областей, игнорирует отсутствие экспериментального подтверждения изменения силы тяжести, сопутствующего притоку субстрата пониженной вязкости в процессе продолжающегося изостатического «всплывания» Фенноскандии, не учитывает «высокую чувствительность» земной коры, обусловленную внутрикоровыми источниками, геофизические и геодинамические эффекты повсеместно трещиноватой земной коры и результаты сверхглубинного бурения на северо-востоке Балтийского щита [1].

Такая ситуация свидетельствует об определенных затруднениях концепции и о необходимости критического рассмотрения ее ключевых положений.

Краткий обзор эволюции изостатических представлений и комментарии. Зарождение изостатических представлений напрямую связано с контракционной геотектонической гипотезой Эли де Бомона (1829, 1852). Гипотеза опиралась на весьма популярные в то время космологические представления о небулярном генезисе Солнечной системы И. Канта (1755) и П. С. Лапласа (1796–1823);



Рис. 1. Угол θ , характеризующий отклонение отвесной линии, обусловленное притяжением горы. 1 — линия отвеса при наличии горы; 2 — линия отвеса при отсутствии горы [4].

на эволюционную гипотезу катастроф Ж. Кювье (1812) и другие передовые представления того времени, что обеспечивало веру в объективность вытекающих из нее выводов. Однако неудовлетворительность объяснения процесса «охлаждение—сжатие—горообразование», и искусственность предположения о приуроченности горных цепей к большим дугам, совпадающим с ребрами вписанного в земной шар икосаэдра, — оказались предвестниками ее недолговечности. Изостатические же гипотезы продолжили «успешное освоение» новых достижений и научных направлений в изучении глубинного строения Земли.

Первыми в этом ряду оказались измерения уклонений отвесных линий вблизи гор, которые во многих случаях оказывались меньшими, чем их теоретические оценки [2–4]. Отклонение отвеса на угол θ , вследствие притяжения горы (рис. 1), в XVIII в. оценивалось по астрономическим

измерениям зенитных расстояний одной и той же неподвижной звезды в меридиане, по разные стороны от горы [3].

Отклонение отвеса на угол $\theta = 7.5''$, обусловленное притяжением горы (вулкана) Чимборасо (*Chimborazo*, рис. 2, *а*), зафиксировали в процессе работы французской экспедиции градусных измерений в Перу П. Буге (1749) и Ш. М. де Ла Кондамин (1754) [2]. Измерения были выполнены только с одной (южной) стороны горы, и их итоги авторами не комментировались. Р. И. Бошкович (1755) [2] объяснил факт занижения угла θ частичным уравниванием «груды возвышающейся материи» (горы) «зиянием пустот» на глубине. Это замечательное высказывание свидетельствует о том, что горным сооружениям, сформированным из того же материала земной коры, что находится под ними, или же сформировавшимся в результате надвигов, необязательно «плавать» на податливом субстрате. Одним из следствий грандиозных тектонических процессов горообразования является трещинное макроуплотнение вещества земной коры в зоне аномальных деформаций до глубин, сопоставимых или превышающих высоты самих горных массивов. Такое разуплотнение весьма трудно зафиксировать известными геофизическими методами, и оно не может быть выявлено при измерениях плотности и пористости «представительных» образцов горных пород, размерами в поперечнике 5—10 см. С другой стороны, в XX в. установлена «долговременная толерантность» Земли к существованию таких глубинных плотностных неоднородностей, как, например, Северо-Атлантическая и Индийская.

В XVIII в. зарождался экспериментальный подход к всестороннему инструментальному изучению природной среды. Затруднения, с которыми пришлось иметь дело в дальнейшем при астрономических и геодезических работах вблизи горных массивов, наиболее ярко проявились в процессе эксперимента по определению средней плотности Земли путем измерения отклонения отвеса горой Шихаллион (*Schiehallion*, рис. 2, *б*) на угол $\theta = 11.6''$ и сопоставления его с рассчитанным значением [2]. Учитывая возможные ошибки измерения углов и определения плотности внутри горного массива, Г. Джеффрис полагал, что в этом методе, «в любом случае, вряд ли можно ожидать точности выше 10 %» [3]. Об искажающем влиянии на измерения угла θ соседних масс, генерирующих Северо-Атлантическую планетарную положительную ундуляцию геоида (около +100 м), исследователи второй половины XVIII—начала XIX вв. могли и не знать.

Однако основной вклад в становление гипотезы изостазии был внесен в 1854, 1855 и 1859 гг., когда Дж. Г. Пратт, выполнявший геодезическую съемку в Индо-Гангской низменности, опубликовал результаты определений уклонения отвесной линии, обусловленного притяжением Гималайских гор. Отметим, что средняя высота этих гор — около 6 км, высота десяти вершин (включая высочайшую из них — г. Джомолунгму, рис. 2, *в* — более 8 км над уровнем моря. Инициатором работ был директор топографического департамента Индии Э. Во, ученик Дж. Эвереста. Измеренные значения оказались в несколько раз меньше расчетных (см. таблицу), что позволило Дж. Г. Пратту предположить существование под Гималаями компенсационных масс. Представляя первоначально кору слоем теста большей толщины на континентах по сравнению с океаническими областями, он позднее предположил существование «компенсационных» масс с меньшими эффективными плотностями относительно «нормальной» литосферы (но и в этих пределах: меньшими — под высокими горными областями и большими

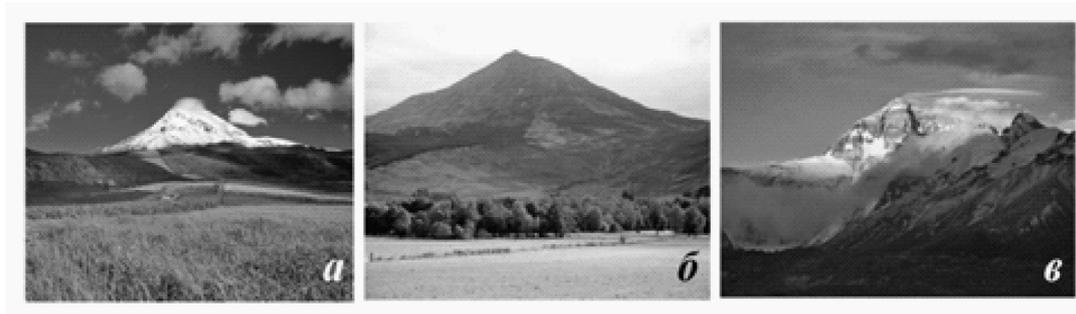


Рис. 2. Измеренные отклонения отвесной линии вблизи горных массивов:
а — г. Чимборасо, Анды, 6 267 м, $\theta = 7.5''$ [5]; *б* — г. Шихаллион, Шотландия, 1083 м, $\theta = 11.6''$ [6];
в — Гималаи (см. таблицу), г. Джомолунгма, 8 848 м [7].

Уклонения отвесной линии (угол θ), по Дж. Г. Пратту

Главные пункты Индийской дуги меридиана ($\lambda = 77^{\circ}42'$ в.д.)	Широта φ пунктов, северная	Значение угла θ'' в меридиане		
		измеренное (относительно п. 3)	рассчитанное	
			начальное	относительное
Кальяна (Kaliana)	29°30'48''	+3.367''	+27.853''	+20.944''
Кальянпур (Kalianpur)	24°07'11''	-1.869''	+11.968''	+5.059''
Дамарджида (Damargida)	18°03'15''	0	+6.909''	0

— под низкими). Эти изменения Дж. Г. Пратт распространил до глубины 200 км, названной позднее «глубиной компенсации» [4, 8]. Ознакомившись с этими работами, директор Гринвичской астрономической обсерватории Дж. Б. Эри (1855) объяснил качественно эти факты и предложил альтернативную схему распределения компенсационных масс постоянной эффективной плотности, но разной протяженности на глубину [9]. При этом мощность коры, «прогибаемой» под нагрузкой горных массивов, он принимал равной 160 км. Согласно Г. Джеффрису [3], «термины “компенсация” и “изостазия” употребляются, чтобы указать на предположение, что масса на единицу площади, измеренная вплоть до некоторой стандартной уровневой поверхности в глубине, приблизительно одинакова для всей поверхности Земли»; и что различие «между равномерно распределенной компенсацией и компенсацией на определенной глубине зависит не от механизма изостазии, а только от нормального распределения плотности с глубиной». Но ведь достоверно мы этого не знаем и ныне. Косвенно подтверждает этот тезис и высказывание проф. В. Хейсканена (1938), директора Изостатического института Международной ассоциации геодезии (Хельсинки), об изостатических гипотезах: «Уже собрано достаточно данных для утверждения, что ни одна из них не верна, но остается важная задача выяснить, насколько каждая из них ошибочна» [3].

Из таблицы следует, что измеренные значения отклонения отвеса в несколько раз меньше расчетных. Об искажающих влияниях соседних глубинных масс, генерирующих Индийскую глобальную отрицательную аномалию геоида (менее -120 м), учет влияния которых на измерения уклонений отвесных линий мог привести к существенно иным выводам, исследователи XIX в. также могли не знать.

В качестве иллюстрации этого тезиса мы воспроизводим схему современного геоида Земли, построенного по материалам регистрации ускорения свободного падения космическим аппаратом (КА) «GOCE» (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) Европейского Космического Агентства. Время «жизни» КА «GOCE» на орбите — с 17.03.2009 г. по 11.11.2013 г., высота орбиты — 270 км, точность определения ускорения силы тяжести и аномалий высот геоида над референцной поверхностью составляет, на базе 100 км, соответственно, $1 \text{ мГал} = 10^{-3} \text{ см/с}^2$ и 1—2 см (рис. 3 [10], см. вклейку).

Центральная область глобальной отрицательной аномалии геоида, в виде «прямоугольного треугольника с почти линейными катетами», двумя отрицательными «рукавами», с перемежающимися высотами, охватывает в северо-восточном и юго-восточном направлениях половину земного шара.

Первая из них прослеживается севернее широты оз. Байкал до побережья Северного Ледовитого океана, между п-вом Таймыр и Новосибирскими о-вами; другая — к морю Росса и Антарктиде, затрагивая часть Австралии. К северо-востоку от эпицентра Индийской планетарной аномалии геоида зафиксирована и другая его особенность — четкое локальное повышение геоида, превышающее примерно на 30 м окружающий отрицательный фон, и соответствующее Гималаям.

Из рис. 3 следует также, что все три описанных района измерений уклонения отвеса в Перу (ныне — в Эквадоре), Шотландии и Индии находятся в областях гравитационных влияний соседних глубинных масс, искажавших эти измерения — относительно слабых в Перу и более сильных в Шотландии и Индии.

Гравитационные аномалии Индии в редукциях Буге и изостатической «в большинстве случаев, являясь геологическими от внутрикоровых источников». Изостатическая компенсация реализуется по схеме Эри. При этом компенсация зафиксированных отрицательных изостатических аномалий на севере страны осуществляется за счет роста мощности «базальтового» слоя коры в двухслойной модели [10], не подтвержденной в процессе сверхглубинного бурения на Балтийском щите [1].

В 1830-х гг., до гляциоизостатического объяснения природы поднятия Фенноскандии, Ч. Ляйэль, основоположник современной геологии, высказался о причинах этого феномена. По его мнению, такими причинами могли быть или тепловое расширение вещества недр, или окристаллизация «густой жидкости», или давление сжатых газов [12].

Изменения высот земной поверхности с позиций изостазии, в связи с изучением процессов гляциации и дегляциации территории Шотландии, впервые детально описал Т. Ф. Джеймисон (1865) — автор гипотезы, известной ныне под названием «гляциоизостазия» [13]. Однако в этой работе детально рассмотрены лишь доказательства формирования прогиба земной поверхности под ледниковой нагрузкой, «на несколько сотен футов» (60—150 м), и постепенного ее восстановления к доледниковому положению.

В 1892 г. американский геолог К. Э. Даттон (*Dutton Clarence Eduard*) предложил термин «изостазия», имея в виду работы Дж. Г. Дарвина (*Darvin George Howard*) [3, 13—15 и др.]. «Я бы предпочел термин “изобария”, — писал он, — но он уже занят» [14]¹. Ссылка при этом на Дж. Г. Дарвина свидетельствует о том, что имелось в виду изучение фигур устойчивого равновесия вращающихся жидких масс планетарных размеров, имевших замечательную историю исследований, начиная с И. Ньютона (1687), Хр. Гюйгенса (1690), А. К. Клеро (1743) [11, 15, 16]. В таком случае, сомнения К. Э. Даттона в использовании термина «изостазия», понятны. Уравнение гидростатического равновесия в виде:

$$dp = \rho \cdot dW ,$$

где p — давление; ρ — плотность; W — гравитационный потенциал, свидетельствует о том, что в случае гидростатического равновесия уровенные поверхности являются также поверхностями равных давлений и равных плотностей. Под влиянием вращения их изначально сферическая форма «приобретает сжатие, зависящее от скорости вращения ω и изменения плотности ρ по глубине» [17].

Далее К. Э. Даттон анализирует факты, основной среди которых — феномен формирования в мелководных морях многокилометровых толщ осадков [14]. Эти процессы в XIX—XX вв. рассматривались в рамках гипотезы геосинклиналей. Они могут свидетельствовать о существовании пределов нагружения и прогибания коры, после достижения которых следует тектонический отклик — активизация процессов горообразования и подъем территории. Но причины прогибания коры в таких процессах под нагрузками осадков $H \approx 1—10$ см/год трудно считать изостатическими.

Обращаясь далее к работам А. Л. Вегенера, мы должны по достоинству оценить его усилия по обоснованию возможности дрейфа континентов, с позиций существования подкорового субстрата пониженной вязкости и изостатической природы послеледникового «всплывания» Фенноскандии. Если «континентальные глыбы действительно плавают на вязком подстилающем субстрате, то нет основания считать, что их подвижность должна проявляться только в вертикальных движениях...» [18].

Оригинальная трактовка А. Л. Вегенером и его предшественниками гипсографической кривой была развита Р. К. Клиге, И. Д. Даниловым и В. Н. Конищевым с привлечением современной обширной геолого-геофизической и океанологической информации к моделированию изменений литосферы, рельефа земной поверхности морского дна и эволюции океаносферы Земли в фанерозое, с детальным освещением гидроклиматических изменений в плейстоцене, голоцене и в историческое время [19].

Представляет интерес отношение к идеям изостазии В. В. Орленка [20], автора современной гипотезы океанизации Земли, изложившего ее в обрамлении «фейерверка» оригинальных идей при обосновании новой контракционной теории, опирающейся на факты выноса на поверхность огромного объема вещества мантии, его дегазации и дегидратации. В результате «истощения» мантии прогнозируется сокращение радиуса Земли, увеличение объема вод, неуклонное повышение уровня Мирового океана и, добавим, очевидное изменение состава атмосферы. Согласно автору, «масса 2—3 км призмы льда, плотностью 0.97 г/см³, составляет менее 1 % от массы 100 км толщи каменной оболочки шита, имеющей плотность 3.2 г/см³. Каким образом столь ничтожный вес может вдавить эту гигантскую глыбу в подстилающую астеносферу?» [20].

На рис. 4 представлена схема А. Л. Блюма для верификации гипотезы изостазии (гляциальной эвстазии и гидроизостазии) на основе анализа времен формирования высот морских террас с известным возрастом на интервале 800 000 лет, с учетом различий в реакции и амплитудах деформаций коры океанов и окраин континентов [21].

¹Перевод оригинального текста К. Э. Даттона выполнен Т. И. Маловой.

К критическим замечаниям на эту схему Р. К. Матьюса, отметившего «большой размах движений мантийного материала» [22], добавим, что серьезные затруднения возникают при допущениях о неизменности высот древних морских террас и «перемещениях» астеносферных масс в условиях вращающейся Земли [23].

В. К. Гуделис описал подъем земной поверхности на территории Прибалтики на 7—10 м, следовавший «волной» за отступающим ледником, и отметил сходство этих движений с типичными техногенными деформациями [24].

В 1963 г. И. Г. Клушин [25] попытался проанализировать проблему взаимосвязи тектонических движений и магматизма с позиций принципа наименьшего действия:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, q', t) dt,$$

где S — действие, L — функция Лагранжа, зависящая от координат q , скоростей dq/dt и времени t , и описываемая разностью кинетической и потенциальной энергий. Все перемещения (движения) в замкнутой системе, каковой аппроксимируется Земля, должны происходить таким образом, чтобы действие S минимизировалось на достаточно коротких интервалах времени. «Подробный анализ функции Лагранжа для всех процессов на Земле и в ее недрах представляет весьма трудную и, вероятно, неразрешимую задачу» [25]. Рассмотрев накопленные к тому времени геолого-геофизические материалы, автор заключает: 1) «Одно из наиболее серьезных возражений, которое встречает гипотеза изостазии состоит в том, что проявление тектонических процессов рассматривается ею как движение, направленное на установление нарушенного чем-либо равновесия. С этой точки зрения геологическая история Земли выглядит как безнадежно долгая и неудачная попытка установить устойчивое равновесие»; 2) «тектонические движения определенного знака обязательно должны быть сопряжены с перераспределением вещества по вертикали, включающим изменение типа коры, процессы магматизма, метасоматоза и т. д.» [25]. Второй вывод не представляется авторам убедительным, поскольку имеются различные, в том числе планетарные механизмы минимизации последствий как региональных, так и локальных проявлений тектонических движений и магматизма, и необходимо считаться с долговременной «толерантностью» Земли к существованию плотностных неоднородностей в ее недрах.

В 1969 г. Н.-А. Мернер обосновал феномен «высокой коровой чувствительности» даже к небольшим осцилляциям ледниковых или водных нагрузок, и распространил его на процессы эвстазии и гидроизостазии [26, 27]. Автор развивал и уточнял идею А. Л. Блюма, рассмотренную выше. Но в таком случае «высокую коровую чувствительность» следует относить к астеносфере, игнорируя реальные свойства повсеместно трещиноватой континентальной и океанической земной коры. Н. И. Николаев и В. И. Богданов отнесли этот же эффект к внутрикоровым источникам [28, 29].

В заключение раздела подчеркнем существенное отличие понятия «изостазия Земли» у К. Э. Даттона от понятия «изостазии земной коры (литосферы)» у современных ее сторонников. В эпоху спутниковых исследований было установлено, что «Земля сжата примерно на 0.5 % сильнее, чем следует из гидростатической теории» [30]. Согласно Ф.

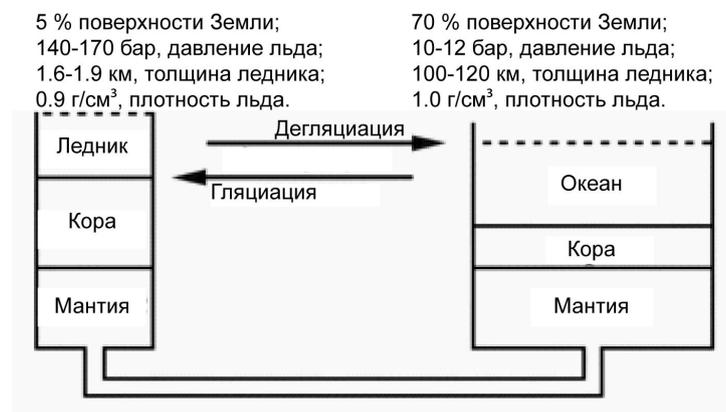


Рис. 4. Равновесная модель планетарной гляциоизостазии, эвстазии и гидроизостазии, по А. Л. Блюму [21].

Стейси, если «случайно развивавшийся» сфероид «вращается, то на его форму накладывается вздутие. Если тело неидеально упругое, то оно принимает равновесную (гидростатическую) форму, накладывающуюся на исходное сжатие. При этом тело поворачивается так, что ось наибольшего исходного (неравновесного) момента инерции совпадает с осью вращения. Кажется маловероятным, что добавочное сжатие представляет собой запаздывание реакции экваториального вздутия на замедление вращения Земли, как это предположили Манк и МакДональд» [30].

Исследования на Кольском геофизическом (геодинамическом) полигоне. Полигон создан в 1965 г. Полярным геофизическим институтом Кольского филиала Академии наук, в рамках Международных программ «Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры» и «Современные движения земной коры», с целями изучения глубинного строения Фенноскандии, феномена ее послеледникового (современного) поднятия, физических и деформационных свойств реальной земной коры, исследования на нем позволили полностью предсказать основные итоги сверхглубокого бурения [31—34], до их освещения в 1984 г. «Представление, что горные породы с глубиной становятся плотнее и пористость их убывает, оказалось неверным, как и точка зрения о сухих недрах. Впервые это было обнаружено при бурении Кольской сверхглубокой, другие скважины в древних кристаллических толщах подтвердили тот факт, что на многокилометровой глубине горные породы разбиты трещинами и пронизаны многочисленными порами, а водные растворы свободно движутся под давлением в несколько сот атмосфер». В этом открытии состоит одно из важнейших достижений сверхглубокого бурения» [35]. Отметим также высокие температуры на глубинах 7 и 12 км: 120 и 230 °С, соответственно [35]. Главные итоги исследований на Кольском геодинамическом полигоне, продолженные с 1980-х гг. на Ленинградском (Санкт-Петербургском) геодинамическом полигоне [32, 36], сводятся к следующим.

1) Установлены: а) градиентное изменение эффективной плотности с глубиной Ковдорского массива ультраосновных-щелочных пород, превышающее глубину залегания «базальтового» и мощность «гравитационно-активного» слоев коры [31, 33]; б) природа слоистости кристаллической коры по сейсмическим наблюдениям отражает ее повсеместное (планетарное и разноранговое) отслаивание вблизи свободной поверхности, переходящее ближе к последней в крутопадающие системы трещиноватости [32]. Всю земную кору с этих позиций можно рассматривать как зону хрупко-дилатансионного состояния недр, или как «дренажную» оболочку Земли [37, 38].

2) В результате статистической обработки измерений 2289 шлифов горных пород в том же районе И. И. Сорокина оценила влияние закрытой пористости на плотность образцов пород (0.1 г/см³), (рис. 5, а) [33]. Одновременно было выполнено дешифрирование аэрофотоснимков на площади 18 000 км², с целями изучения влияния повсеместной трещиноватости кристаллических пород разного ранга на плотностные свойства горных пород (рис. 5, б—з), [33, 34].

3) По материалам метода отраженных волн (МОВ) на Балтийском щите, примененного в 1958—1959 гг. Г. Н. Шаблинским (рис. 6) [39], установлено подобие в распределении по глубине числа отражающих площадок в гнейсах (Ag) и базитах (Prz) при изучении контактов Хибинских и Ловозерских щелочных плутонов центрального типа (отражения в самих массивах не зафиксированы). Исследования однозначно свидетельствовали об отсутствии «базальтового слоя» в разрезе земной коры Северо-востока Балтийского щита, что и было подтверждено в процессе сверхглубинного бурения [1].

4) Обобщение материалов о масштабных зависимостях плотности и пористости кристаллических пород Балтийского щита в шлифах, расчистках, обнажениях, карьерах, по оценкам результатов

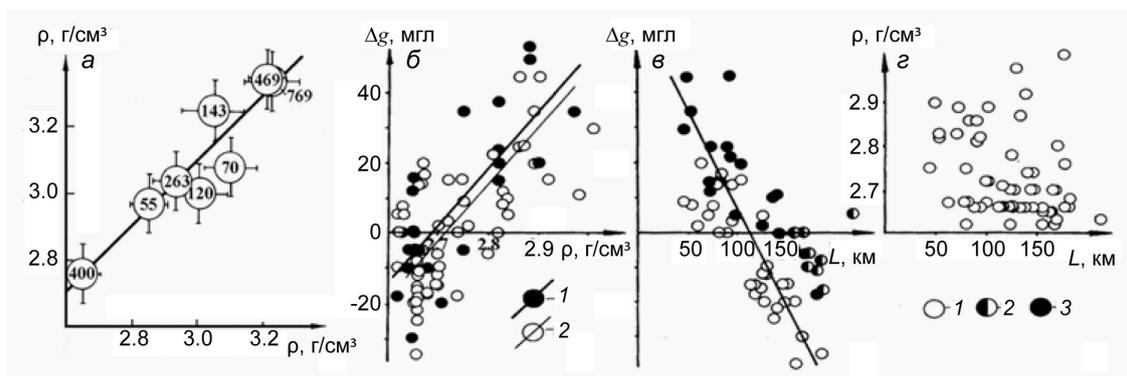


Рис. 5. График корреляции.

- а — плотность, измеренная по образцам (5—10 см) с минералогической плотностью (измерения площади зерен в шлифах);
- б — средняя аномалия Δg в редукции Буге с плотностью образцов (5—10 см) по петроплотностным картам:
- 1 — для всего Кольского п-ва, 2 — для основной части геофизического полигона; в — Δg с суммарной длиной линейных элементов, подсчитанных для квадратов 16×16 км: 1 — кислые и щелочные породы; 2 — породы Хибинских и Ловозерских массивов; 3 — основные и ультраосновные породы; г — корреляция « ρ - L » отсутствует.



Рис. 6. Сейсмические разрезы земной коры МОБ, по Г. Н. Шаблинскому, с дополнениями [33, 39], через западный контакт Хибинского (а) и северный контакт Ловозерского щелочных плутонов (б).

1 — сейсмические профили; 2 — отражающие площадки; 3 — контакт по гравиметрическим материалам; 4 — контакт по сейсмическим наблюдениям; 5 — предполагаемый сброс; N — суммарное число отражающих площадок, подсчитанных на километровых интервалах глубин [32].

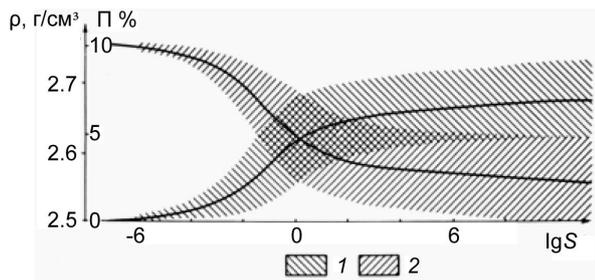


Рис. 7. Масштабные зависимости.

1 — пористости (П%); 2 — плотности (г/см^3) горных пород Балтийского щита от размеров исследуемой площади ($S, \text{км}^2$) [32—34].

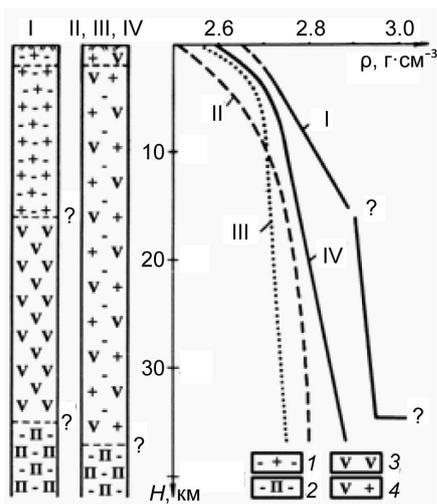


Рис. 8. Градиентные плотностные модели коры [40, 41].

I — многослойная модель Украинского и Балтийского щитов К.Ф. Тяпкина; II, III — варианты однослойной модели Балтийского щита, с учетом градиента сейсмических волн в верхней части коры; IV — то же, с учетом средневзвешенного значения по петроплотностным картам.

1 — «гранитный» и 2 — «базальтовый» слои; 3 — подкорковый субстрат; 4 — однослойная неоднородная кора.

дешифрирования аэрофотосъемок позволило построить зависимости этих величин от масштабов исследуемых территорий (рис. 7).

5) Физические свойства горных пород в объемах, превышающих поперечные размеры лабораторных образцов, размерами около 5—10 см, на 2—6 и более порядков, изучены весьма схематично. Но именно свойства пород в таких объемах определяют физические поля, особенности разномасштабного поведения среды в различных условиях, деформации крупных участков литосферы. Повсеместная разноранговая трещиноватость коры Балтийского щита обуславливает характерное устойчивое макроразуплотнение пород, достигающее вблизи дневной поверхности, на масштабах 10^4 — 10^6 м, 0.10 — 0.15 г/см^3 . Результаты обработки материалов дешифрирования аэрофотоснимков, полевые определения коэффициентов трещинной «пустотности» и макропористости, геофизические данные, а теперь уже и результаты глубинного бурения позволяют обосновать однослойную градиентную плотностную модель коры без выделения «гранитного» и «базальтового» слоев (рис. 8) [33, 40, 41].

Сравнение различных плотностных моделей земной коры — градиентной многослойной модели Украинского и Балтийского щитов К. Ф. Тяпкина (1972), двухслойных Б. А. Андреева (1965) и Е. Penttilä (1972) для Фенноскандии в целом — с моделью IV [40], свидетельствует о том, что расхождения между ними сравнимы с отличиями вариантов двухслойной модели, но для стандартной колонки коры, мощностью 40 км, эти отличия достигают массы километровой горного массива [40, 41].

Изменение плотности ρ (г/см^3) в итоговой модели IV (рис. 8) с глубиной H (км) описывается выражением [40, 41]:

$$\rho = \begin{cases} 2.59 + 0.0433 \cdot H - 0.00471 \cdot H^2 + 0.000198 \cdot H^3 & 0 \leq H \leq 10 \\ 2.70 + 0.0050 \cdot H & 10 \leq H \leq 37 \end{cases} \quad (1)$$

б) Если плотность $\rho(z)$ изменяется согласно (1), то при сжатии толщи верхней части земной коры и закрытии трещинных макропоровых пространств в слое $H = 0-10$ км амплитуда его сокращения составит [40, 41]:

$$\Delta H = H - \rho_H^{-1} \cdot \int_0^H \rho(z) \cdot dz \approx 190 \text{ м}, \quad (2)$$

где ось z направлена вглубь Земли по нормали к ее поверхности.

Однако нет оснований предполагать закрытие всей макропористости в условиях обычно встречающихся нагрузок: опорными скважинами на Русской платформе зафиксирована трещиноватость фундамента, перекрытого мощной толщей осадочного чехла. Частичное же закрытие трещиноватости под нагрузкой подтверждается деформациями кристаллических пород техногенной природы, возрастанием граничной скорости по поверхности фундамента по мере его погружения, и подразделением «гранитного» слоя на два подслоя в пределах Балтийского щита [42]. Натурные эксперименты в горном деле, выполненные во многих регионах мира [43], свидетельствуют об определяющем влиянии трещиноватости на прочностные свойства скальных массивов *in situ* на масштабах $1-10^2$ м, в среднем на порядок, по сравнению со значениями, получаемыми на образцах. Полагая, что верхние 10 км градиентной коры под нагрузкой ледника ведут себя как стандартное линейное тело [17], и, принимая среднее отношение статического и мгновенного модулей $\mu_\infty/\mu = 0.1$, $\mu = 3 \cdot 10^4$ МПа, $\sigma = 30$ МПа, получим:

$$\Delta H = \frac{\sigma}{\mu_\infty} \cdot H = 100 \text{ м},$$

что по порядку величины совпадает с оценкой (2). Факты «высокой коровой чувствительности» в широком диапазоне изменения ледниковых, водных и техногенных нагрузок, а также натурные эксперименты в горном деле свидетельствуют о способности трещиноватой коры к обратимым деформациям, превышающим чисто упругую компоненту сплошного твердого тела. Такие деформации, условно называемые в дальнейшем «квазиупругими», проявляются в процессе упорядочения «кусочной» структуры коры [43] и определяются сжатием/расширением макропоровых трещинных пространств, аккумулярованием и перераспределением энергии деформации жидкими и газовыми флюидами; размерами «кусков», характером их контактов, общей ориентацией трещин, свойствами флюидов и трещиноватых пород. Градиентный характер изменения макропористости с глубиной приводит к предположению, что характер движений земной поверхности в такой модели определяется различными вкладами одних и тех же механизмов на разных глубинах и в разных условиях, широким спектром времен релаксации и явлением неполностью обратимо процесса, обусловленным изменениями геометрии поровых пространств. С этих позиций, изучение реологических свойств тектоносферы по распределению в пространстве и времени деформаций земной поверхности относится к классической проблеме «обратной задачи геофизики».

Обобщение материалов комплексных исследований современных движений земной коры, позволило сформулировать вывод о внутрикоровых источниках обратимых деформаций, превышающих чисто упругую компоненту сплошного твердого тела, и объяснить совокупность фактов, сопутствующих «приложению/снятию» нагрузки, процессами [23, 24, 29, 40, 41]: 1) «сжатия/расширения» макропоровых трещинных пространств повсеместно трещиноватой верхней части земной коры (0—10 км) и «повышения/снижения» порового давления, обеспечивающего «работу» механизма обратимых квазиупругих деформаций; 2) изменения состояния многофазной среды (ниже 10 км) в зависимости от $P-T$ условий, интенсивности, размеров и длительности приложения нагрузки, обеспечивающего «повышенную чувствительность» (эластичность) океанической и нижней части континентальной коры.

Активизация рифтогенных геотектонических процессов и феномен Фенноскандии. Многие исследователи считают Фенноскандию классической областью проявления гляциоизостатических процессов. Но именно здесь и были получены существенные результаты, свидетельствующие о более сложной природе этого явления [44]. На рис. 9 представлена схема современной версии феномена поднятия Фенноскандии.

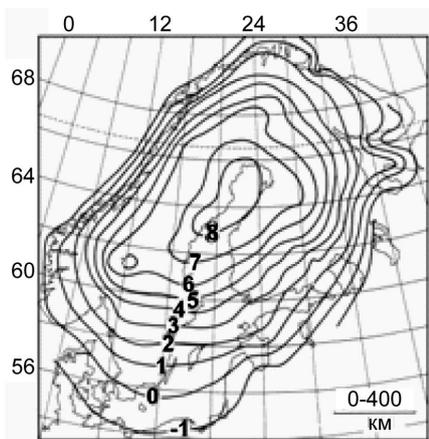


Рис. 9. Схема изолинии новейших и современных поднятий земной коры Фенноскандии, в см/год, L. E. Sjöberg, 1991 [45].

Причем изолинии на этой схеме представлены сплошными линиями, хотя ранее многие из них изображались пунктирами, что отражало степень их достоверности, как в смысле привязки к местности, так и в смысле генезиса, поскольку в горных условиях древние морские террасы зачастую неотличимы от тектонических уступов. Однако мысль об «идеальном» совпадении границ ледника, области послеледникового компенсационного поднятия и постепенного сокращения соответствующего изометричного гравитационного фона продолжает владеть умами исследователей, хотя такой «комфортной» для гляциоизостазии картине противоречат факты оледенения шельфа Баренцева и других арктических морей [46], а также современные геофизические сведения о гравитационном поле региона.

На рис. 10 сопоставлены сейсмическая активность Северной Атлантики и Фенноскандии, свидетельствующая о современной активизации эндогенных тектонических процессов в глобальном и региональном масштабах [47].

На рис. 11 представлена первая гравиметрическая карта Фенноскандии в редукции «в свободном воздухе» [48]. На последующих картах отрицательная аномалия над Ботническим заливом прослеживается до Баренцева моря. Обратим внимание на тот факт, что линейные гравиметрические аномалии и сейсмоактивные зоны не согласуются с изометричным куполообразным поднятием территории Фенноскандии на рис. 9.

Сравнительно незначительный фон зарегистрированных на дневной поверхности в Финляндии тангенциальных напряжений, генерируемых в Северной Атлантике [49], не дает основания считать их таковыми же в прошлом. А целый ряд признаков свидетельствует о необходимости возвращения к примату натурных наблюдений и опыту: поперечная система региональных гравитационных аномалий, подчиненных каледонидам Скандинавских гор и глобальной системе рифтогенеза в Северной Атлантике (рис. 10), надвиг каледонид на образования Балтийского щита («не менее чем на 100 км»), асимметрия и перекося Скандинавских гор, записи сейсмической группы NORSTAR, свидетельствующие о том, что структура литосферы по-разному выглядит в лучах, распространяющихся в субгоризонтальных и субвертикальных направлениях [50].

На рис. 12 представлены геоид Европы в конформной проекции [51] и современный геоид Балтийского моря [52, 53].

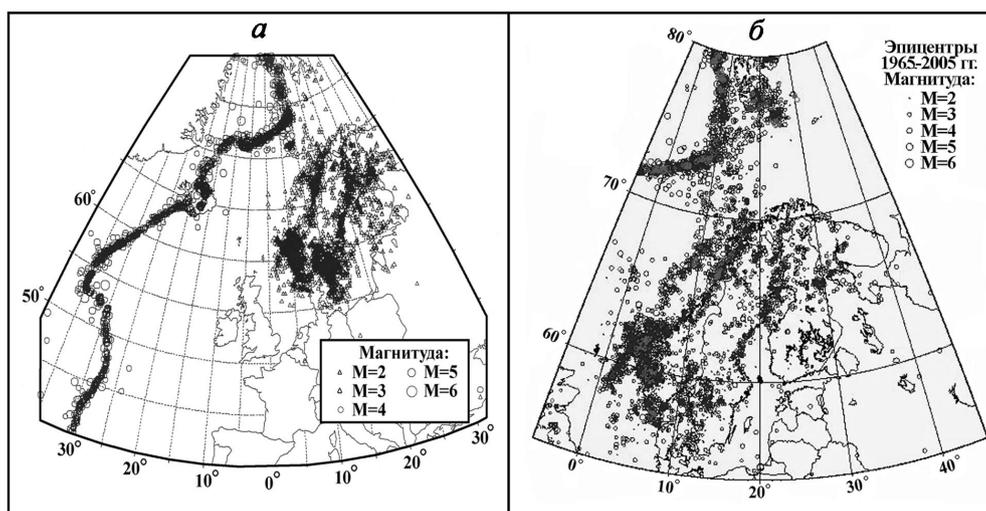


Рис. 10. Сейсмическая активность Северной Атлантики (а) и Фенноскандии (б), по данным Сейсмологического института Хельсинкского университета, с дополнениями [47].

Впервые Ботническо-Вислинская структура в качестве «недоразвитого рифта» была выделена в пределах Фенноскандии и Польши В. А. Левченко и Е. Н. Востоковым [54]. Обращает на себя внимание различный характер геоида на рис. 12: спокойный на востоке и осложненный глобальной Северо-Атлантической аномалией на западе Европы. В качестве «геоидальной ступени» линеамент прослеживается от побережья Баренцева моря вдоль западного берега, пересекает Прибалтийскую и Польскую низменности, предгорья Карпат и западный берег Черного моря через различные морфоструктурные элементы. В тектоническом плане линеамент включает Ботническо-Вислинскую рифтогенную структуру, пограничную зону Восточно-Европейской платформы с участками разломов Тейсейра—Торнквиста и Варта, западную границу Черноморской депрессии, а между срединными массивами Родопских гор и Мендерасс выходит в область тройного сочленения впадины Средиземного моря, рифта Красного моря и Великих Африканских разломов [40, 47, 53].

Тектоническое продолжение линеамента можно наметить и в Арктике, связав его с отдельными участками крупных субмеридиональных сквозьструктурных швов Шпицберген-Вардар, Лапландско-Нильским или Кольско-Воронежским [47]. Таким образом, рассматриваемая планетарная зона, подчиненная, по всей вероятности, процессам формирования Срединно-Атлантического рифта, пересекает различные геоструктуры и включает тектонические элементы разного типа, возраста

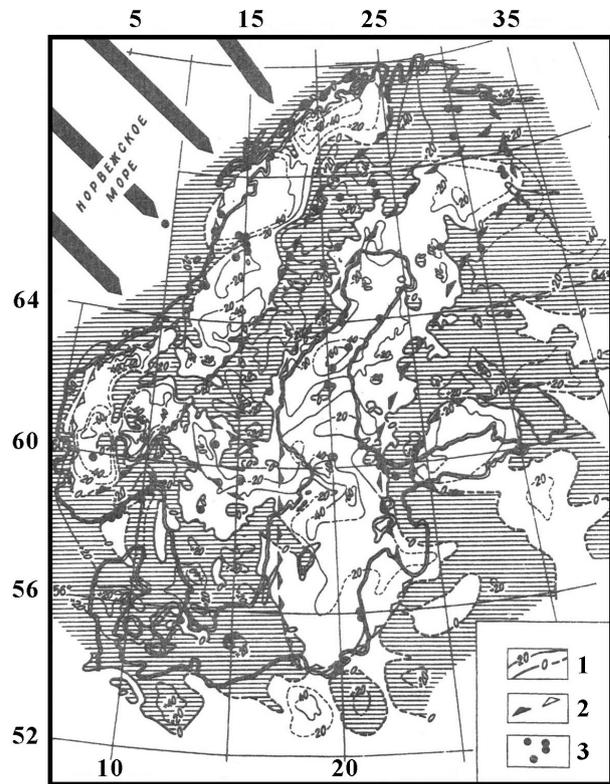


Рис. 11. Схема формирования глыбовой структуры Фенноскандии в условиях тангенциальных напряжений (условно показаны стрелками). 1 — изолинии поля силы тяжести Δg в редукции «в свободном воздухе», в мгал, по Т. Honkasalo [48]; 2 — линии максимальных горизонтальных градиентов поля Δg в редукции Буге, достоверные и менее достоверные, по В.И. Богданову [33]; 3 — эпицентры землетрясений, зарегистрированных в период МГТ [48]. Заштрихованы положительные аномалии.

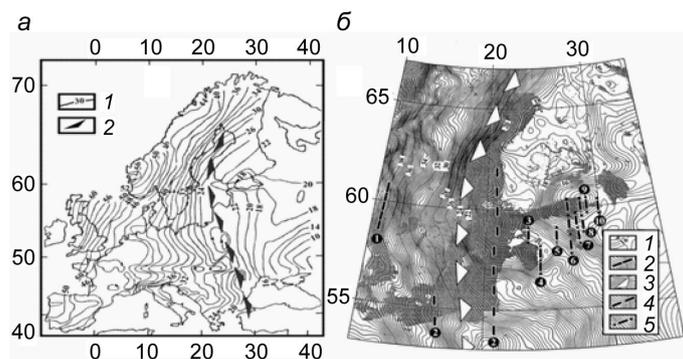


Рис. 12. Геоиды Европы и Балтийского моря.

а — геоид (квазигеоид) Европы в конформной проекции, с использованием первых опубликованных гравиметрических материалов СССР. Система GRS, 1967. Изолинии проведены через 2.0 м [51]; 1 — изолинии превышений геоида над референц-эллипсоидом; 2 — Фенноскандинавско-Средиземноморский линеамент геоида [40]; *б* — гравиметрический геоид Балтийского моря. Высотная система Финляндии, эпоха 1994.4 г. [52] с дополнениями: 1 — изолинии превышений геоида над референц-эллипсоидом (проведены через 0.25 м). Фрагменты субмеридиональных линеаментов [47; 53]: 2 — часть линии Г. Штиле «Мьеса-Средиземное море»; 3, 4 — Фенноскандинавско-Средиземноморский линеамент геоида и его границы; 5 — субмеридиональные дизъюнктивные нарушения, установленные и предполагаемые (белые цифры в черных кружках): 1) грабен Осло; 2) границы Ботническо-Вислинской рифтогенной структуры; 3) Западно-Эстонская; 4) Рижская; 5) Вирц-Ярвская; 6) Гогландско-Чудская; 7) Западно-Кургальская; 8) Выборско-Лужская; 9) Восточно-Копорская; 10) Сестрорецкая.

и генезиса. Процессы рифтогенеза и эволюции Северной Атлантики и смежных областей позволяют считать рифтовой природу линеамента геоида в пределах Фенноскандии. Об этом свидетельствуют наложенный характер структуры, секущей древний тектонический план Балтийского щита, существование зон разломов, линейных сейсмоактивных зон, полосовой отрицательной аномалии силы тяжести. Сейсмические данные по региону свидетельствуют об активности вершины Ботнического залива, западного борта линеамента и его виртуальных продолжений в северных и восточном румбах. По видимому, процесс «врезания» рифта и перестройки структурного плана докембрийского кратона сопровождается дроблением и разуплотнением коры, формированием на фронте флюидодинамического воздействия рифта каймы специфического рельефа (возвышенность Манселькя), тектонической активизацией и поднятием всего региона. С этих позиций современные геодинамические процессы действительно направлены на раскол Фенноскандии и Балтийского щита и отчленение от них собственно Скандинавского и Кольского п-овов [40, 44, 47, 53]. Отметим также, что на продолжении линеамента к северо-северо-востоку (рис. 10) была заложена Кольская скважина сверхглубинного континентального бурения, практически полностью подтвердившая изложенные выше представления об однослойной и в одинаковой степени неоднородной модели земной коры, об отсутствии «базальтового» слоя и о макропористости реально трещиноватой земной коры.

Но если результаты сверхглубинного бурения [1] в области аномальных температур, напорных жидких флюидов и свойств вещества недр находят объяснение с позиций заложения скважины в пределах активизирующейся рифтогенной структуры, то изостатический механизм послеледникового «всплывания» Фенноскандии требует пересмотра с учетом плотностной градиентной модели земной коры и механизмов обратимых квазиупругих деформаций флюидонасыщенной коры [24, 29].

В заключение этого раздела остановимся кратко на результатах прямого эксперимента стран Северной Европы по верификации изостатической природы феномена послеледникового и современного поднятия Фенноскандии. Согласно Т. Хонкасало, линейные (полосовые) гравитационные и сейсмоактивные зоны порождают сомнения в изостатической природе феномена послеледникового и современного поднятия Фенноскандии [48]. На этом основании он предложил организовать повторные прецизионные наблюдения вдоль субширотных профилей, пересекающих Фенноскандию, и сопоставить результаты наблюдений с двумя модельными оценками [55]. В обозначениях М. Екман [49], эти оценки составляют, соответственно (в микрогаллах = 10^{-8} м/с²), для модели Буге (в результате компенсационного притока подкорковых масс с плотностью мантийного материала) на 1 мм поднятия Фенноскандии:

$$\left(\dot{g} / \dot{h}\right)_{Bouger\ model} = 2g / R + 2\pi G\rho = -0.17 \text{ мкгал/мм},$$

а для модели «в свободном воздухе» (в результате только подъема Фенноскандии):

$$\left(\dot{g} / \dot{h}\right)_{Free\ air\ model} = 2g / R = -0.31 \text{ мкгал/мм}.$$

Согласно анализу А. Kiviniemi [56—58], вариации гравитационного поля, которые должны были за 13-летний период повторных наблюдений превысить ожидаемые оценки ошибок измерений, в действительности либо лежат в пределах последних, либо тенденции их изменений не согласовывались с характером современных вертикальных движений земной поверхности, связываемыми с проявлениями изостатического процесса. Аккуратный учет разнообразных факторов, оказывающих влияние на результаты измерений, метрологическое обеспечение, высокая точность, достаточные продолжительность наблюдений и число повторных измерений, – привели автора к выводу об отрицательном результате прямого гравиметрического эксперимента в отношении изостатической природы феномена Фенноскандии. Экспериментальные исследования ведутся по 4 профилям, проложенным приблизительно вдоль широт $\varphi = 61^\circ, 63^\circ, 65^\circ$ и через Данию. Исследования по обеспечению этого важного научного эксперимента в последние десятилетия развивались в направлении изучения различных «тонких» эффектов, которые могли бы способствовать повышению эффективности измерений. Также обсуждаются пути кардинального повышения точности измерений с привлечением «абсолютных» и «криогенных» гравиметров [59]. Поиски путей всестороннего участия российских организаций в этом эксперименте по-прежнему являются актуальными.

Масштабные эффекты в геофизике и геодинамике. Фактически с масштабными эффектами давно знакомы, например, физики: «удельный вес» \neq «объемному весу». Аналогичные отличия физико-механических и прочностных свойств лабораторных образцов от свойств пород *in situ* известны специалистам в области инженерной геологии [43]. Геофизики знают, что ньютоновское притяжение внешней точки слоем, ограниченным двумя уровнями поверхностями, в два раза превышает притяжение плоско-параллельного слоя той же мощности, но бесконечного простираения. Таким образом, к детским воспоминаниям об антиподальных людях, ходящих «вниз головами», добавляются сведения о планетарном участии всех «уровневых» слоев в формировании фигуры Земли. Мы рассмотрим некоторые масштабные эффекты как продолжение исследований на Кольском геофизическом полигоне в рамках тематики настоящей статьи. При этом можно предполагать, что отличие квазиупругих («эластичных») свойств тектоносферы океанов от свойств континентов связаны с большей их площадью, занимающей $\sim 70.8\%$ поверхности Земли, идеальной нагрузкой и эффективным изолирующим покровом. «Загадочные» техногенные катастрофы с позиций масштабного эффекта обсуждает С. И. Суханов [60].

Рост порового давления P во флюидонасыщенной трещиноватой коре приводит к снижению критических касательных напряжений τ , и они обращаются в нуль при падении до нуля эффективных нормальных напряжений $(\sigma - P)$, φ — угол внутреннего трения:

$$\tau_{\text{теоретич.}} = (\sigma - P) \operatorname{tg} \varphi.$$

Такая среда способна к течению горных масс, формированию шарьяжных покровов, надвигов, проскальзыванию одних слоев коры или их фрагментов относительно других.

Формальный математический аппарат, хорошо развитый в применении к высокополимерным эластичным материалам, требует при описании сложных видов вязко-упругого поведения вещества набора, например, времен релаксации (τ). Многокомпонентные реологические системы математически эквивалентны ряду соединенных параллельно элементов Максвелла, при условии включения в ряд «вырожденного элемента», со временами релаксации $\tau = 0$ или $\tau = \infty$. Описание сложных типов вязко-упругого поведения вещества в таком случае сводится к изучению зависимости деформации (ε) от напряжения (σ) с различными временами τ ; где $\mu(\tau)$ — доля деформационного модуля функции распределения, обусловленного механизмами, время релаксации которых лежит в интервале от τ до $\tau + d\tau$:

$$\sigma = \varepsilon \int_0^{\infty} \mu(\tau) \cdot e^{-t/\tau} d\tau.$$

При таком подходе задача исследований — установление вида функции распределения модуля, обусловленного механизмами, время релаксации которых лежит в доступных измерениям пределах. Организация специальных обсерваторских наблюдений на путях прохождения волн цунами, частых штормовых нагонов, в областях аномальных морских приливов, колебаний уровней в водохранилищах, осцилляций современного ледникового покрова в Гренландии и Антарктиде, строительства городов и крупных гидротехнических сооружений, — могут способствовать изучению реологических свойств верхней части коры в интервале 0.1—1.0 МПа и периодов 10^3 — 10^9 с [41, 44]. При решении таких фундаментальных задач подразумевается широкое использование глубинных скважинных реперных систем, разработанных в Эстонии и России [53], а также всестороннее обеспечение и поддержка экспериментальных исследований.

Подводя итоги выполненному анализу современной геотектонической концепции изостазии, объединяющей ныне такие глобальные явления, как неоднократные оледенения в истории Земли с сопутствующими им процессами гляциоизостазии: океанической эвстазии — с процессами гидроизостазии; эпохи горообразования или аналогичные по масштабам области деформаций земной поверхности или морского дна — с процессами литоизостазии, мы должны отметить неудовлетворительное решение многих вопросов современной геологии и геодинамики.

1) Для Фенноскандии, например, с изостатических позиций, полностью или частично игнорируется современная тектоническая и сейсмическая активность Атлантического побережья региона и Вислинско-Ботнической рифтогенной и Ботническо-Ладожской структур; замалчиваются отрицательный результат гравиметрического эксперимента стран Северной Европы; оценки сокращения макро-трещиноватой коры в слое 0—10 км почти на 200 м; другие итоги исследований на Кольском геодинамическом полигоне; а также результаты сверхглубокого бурения.

2) Сторонниками изостатической концепции не рассматривается и альтернативный изостатическому механизм реакции многофазной трещиноватой среды при изменении термодинамических условий.

3) По мнению авторов, особое внимание в ближайшее время должно быть обращено на так называемые «масштабные эффекты» в геологии, геодинамике и геофизике, связанные с проявлением феномена «высокой коровой чувствительности» реальной среды, например континентальной и океанической коры, на воздействия разноранговых эффектов.

4) Вместе с тем несомненен существенный вклад одной из старейших геологических и геодинамических концепций в развитии общих научных представлений о развитии Земли.

Литература

1. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Недра. 1994. 490 с.
2. *Тодхантер И.* История математических теорий притяжения и фигуры Земли от Ньютона до Лапласа / Пер. с англ., под ред. А. И. Оснача. М.: Эдиториал УРСС, 2002. П. 1–1632. 672 с.
3. *Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и развитие / Пер. с англ. В. Я. Барласа и др., под ред. В. И. Кейлис-Борока и В. А. Магницкого. М.: Ин. лит, 1960. 486 с.
4. *Цубои Т.* Гравитационное поле Земли / Пер. с яп. И. И. Иванчика, под ред. С. А. Ушакова. М.: Мир, 1982. 288 с.
5. Изображение горы Чимборасо. URL: <http://ngorod.net/vulkany/chimboraso/photo-9/> (Дата обращения: 16.03.2015).
6. Изображение горы Шихаллион. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Schiehallion_experiment#/media/File:Schiehallion_01.jpg. (Дата обращения: 16.03.2015).
7. Изображение горы Джомолунгма. URL: <http://lowticket.ru/wp-content/uploads/2012/09/17.jpg>. (Дата обращения: 1.04.2015).
8. *Pratt J. H.* On the deflection of the plumb-line in India, caused by the attraction of the Himalaya mountains and of the elevated regions beyond; and its modification by the compensating effect of a deficiency of matter below the mountain Mass // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1859. V. 149. P. 745—778.
9. *Airy G. B.* On the computation of the effect of the attraction of mountain masses as disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1855. V. 145. P. 101—104.
10. *Qureshy M. N., Warsi W. E. K.* A Bouguer anomaly map of India and its relation to broad tectonic elements of the sub-continent // *Geoph. J. of the Roy. Astr. Soc.* 1980. V. 61, N. 2. P. 235—242.
11. Модель геоида Земли «GOCE» Европейского космического агентства. URL: https://www.google.ru/search?q=%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C+%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%B8%D0%B4%D0%B0+%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8,+GOCE&newwindow=1&biw=1676&bih=833&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=zL8GVcq nG8rcywP0wYHQAg&ved=0CAYQ_AUoAQ#imgrc=aeuV8kFFINMojM%3A. (Дата обращения: 16.03.2015).
12. *Ляйэль Ч.* Основные начала геологии или новейшие изменения Земли и ее обитателей: В 2 т. / Пер. с англ. А. Мин. М.: Изд. А. Глазунова, 1866. Т. 2. 462 с.
13. *Jamieson T. F.* On the history of the last geological changes in Scotland // *The Quart. J. of the Geol. Soc. London.* 1865. V. 21. P. 161—203.
14. *Dutton C. E.* On some of the great problems of physical geology // *Bull. Wash. Phil. Soc.* 1889. N. 11. P. 51—64.
15. *Дарвин Дж. Г.* Приливы и родственные им явления в Солнечной системе / Пер. с англ. В. В. Серафимовича. М.—Пг.: Госиздат, 1923. 328 с.
16. *Press W. H., Teukolsky S. A.* On the evolution of the secularly, viscous Maclaurin spheroids // *Astroph. J.* 1973. V. 3. P. 513—517.
17. *Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
18. *Вегенер А.* Происхождение континентов и океанов / Под ред. П. С. Воронова, П. Н. Кропоткина. Пер. с нем. П. Г. Каминского, В. З. Махлиной. Отв. ред. П. Н. Кропоткин. Л.: Наука, 1984. 286 с.
19. *Клиге Р. К., Данилов И. Д., Конищев В. Н.* История гидросферы. М.: Научный Мир, 1998. 368 с.
20. *Орленок В. В.* История океанизации Земли. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 248 с.
21. *Bloom A. L.* Pleistocene shorelines: a new test of isostasy // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 1967. V. 78, N. 12. P. 1477—1494.
22. *Matthews R. K.* Tectonic implication of glacio-eustatic sea level fluctuations // *Earth and plan. Sc. letters.* 1969. V. 5, N. 7. P. 459—462.
23. *Богданов В. И., Малова Т. И.* Перспективы экспериментального изучения феномена «высокой коровой чувствительности» в процессах эвстазии, гидро-, гляцио- и литоизостазии // Тр. XII Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и геофизики». СПб.: Нестор-История, 2014. С. 256—258.
24. *Николаев Н. И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 492 с.
25. *Клушин И. Г.* Взаимосвязь тектонических движений и магматизма Земли на основе вариационного принципа наименьшего действия // *Зап. ЛГИ.* 1963. Т. XLVI. Вып. 2. С. 33—50.
26. *Mörner N.-A.* The late Quaternary history of the Kattegatt Sea and the Swedish west coast. Deglaciation, shorelevel displacement, chronology, isostasy and eustasy. *Sver. geol. under. Ser C. N. 640. Ersbok 63. N. 3.* Stockholm, 1969. 487 p.
27. *Mörner N.-A.* Relation between Ocean Glacial and crustal changes // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 1971. V. 82, N. 3. P. 787—788.
28. *Николаев Н. И.* Эвстазия, изостазия и вопросы неотектоники // *Вестн. МГУ. Сер. геология.* 1972. № 1. С. 6—22.
29. *Богданов В. И., Николаев Н. И.* Концепция механизма глобального тектогенеза в геофизике и неотектонике // Тр. Междун. конф. «Современные проблемы новейшей тектоники и геоморфологии». СПб.: Минерал, 1997. С. 19—22.
30. *Стейси Ф.* Физика Земли / Пер. с англ. А. А. Гвоздева и Д. М. Печерского, под ред. В. Н. Жаркова. М.: Мир, 1972. 343 с.
31. *Богданов В. И., Сорокина И. И.* Оценка изменения плотности кристаллических пород земной коры с глубиной в районе Ковдорского щелочно-ультраосновного массива (Кольский геофизический полигон) // *ДАН.* 1967. Т. 173. № 6. С. 1313—1316.

32. Богданов В.И. О природе слоистости земной коры на северо-востоке Балтийского кристаллического щита // ДАН. 1967. Т. 174. № 1. С. 88–91.
33. Исследования строения и современных движений земной коры на Кольском геофизическом полигоне / Под ред. Ю.Д. Буланже, Ю.А. Мещерякова. М.: Наука. 1972. 164 с.
34. Богданов В.И. Вычисление гравитационных аномалий от трехмерных тел / Под ред. Д.Г. Успенского. Л.: Наука. 1974. 96 с.
35. Пичугина Т. Во глубине горячих руд... / Косультанты: В.И. Горбачев, Д.М. Губерман, А.В. Липилин // Вокруг Света. 2004. № 10. С. 146–158.
36. Состояние равномерных наблюдений и проблема Кронштадтского футштока // Под ред. Ю.Д. Буланже, В.И. Богданова, И.С. Грамберга, Н.Н. Лазаренко. М.: Междуведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР. 1986. 135 с.
37. Николаевский В.Н. Граница Мохоровичича как предельная глубина хрупко-дилатансионного состояния горных пород // ДАН. 1979. Т. 249. № 4. С. 817–821.
38. Григорьев С.М., Емцов Е.М. Скульптор лика земного. М.: Мысль. 1977. 192 с.
39. Шаблинский Г.Н. Метод отраженных волн при исследовании глубинного строения щелочных массивов Кольского полуострова // Зап. ЛГИ. 1963. Т. XLVI. Вып. 2. С. 28–32.
40. Богданов В.И. К вопросу о природе феномена Фенноскандии // Proc. 2nd Baltic Conference «Geodesy and Cartography». Riga: Univ. of Latvia. 1995. P. 90–114.
41. Богданов В. И. Геофизические и геодинамические аспекты модели трещиноватой земной коры // Геофиз. иссл. литосферы Европ. Севера СССР. Апатиты: КНЦ АН СССР. 1989. С. 12–22.
42. Резанов И.А. Геологическая интерпретация сейсмических зондирований земной коры. М.: Недра. 1980. 204 с.
43. Мюллер Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов / Пер. с нем. Р.И. Тедера, под ред. М.М. Протождяконова. М.: Мир. 1971. 256 с.
44. Богданов В.И. Обобщение представлений о природе феномена послеледникового поднятия Фенноскандии // ДАН. 2010. Т. 433. № 1. С. 102–105.
45. Sjöberg L.E. Introduction // Terra Nova. 1991. V. 3. N 4. P. 353–355.
46. Гросвальд М.Г. Последний Евроазиатский ледниковый покров // Мат. гляциол. иссл. 1977. Вып. 30. С. 45–60.
47. Богданов В.И., Кременеца Е.О., Певнев А.К. О сейсмологических условиях вдоль трассы Российско-Европейского газопровода в Балтийском море // Сейсмические исследования в арктических и приарктических регионах / Под ред. Ф.Н. Юдахина. 2011. С. 114–122.
48. Honkasalo T. On the land uplift in Fennoscandia // Geoph. 1960. V. 7. N 2. P. 117–119.
49. Kakkuri J. Geodesy and Geophysics, Lecture Notes for NKG. Autumn School 1992 / Ed. J. FGI. 1993. N 115. 304 p.
50. Винник Л.П., Давыдова И.И., Косминская И.П. Строение тектоносферы по сейсмическим данным // Тектоноф. Земли. М.: Наука. 1978. С. 179–219.
51. Bhattacharji J.C., Srivastava A.M.C. European geoid on GRS-67 // Proc. of the Gen. Meeting of the Int. Ass. of Geodesy. Tokyo, 1982. P. 504–508.
52. Kakkuri J., Poutanen M. Geodetic determination of the surface topography of the Baltic Sea // Mar. Geod. 1997. V. 20. N 4. 9 p.
53. Богданов В.И. Кронштадтский футшток и его Шепелевский дублер. Стратегия фундаментального обсерваторского изучения вековых и тысячелетних изменений природной среды в Санкт-Петербургском (Балтийско-Ладожском) регионе. СПб.: Нестор-История. 2015. 248 с.
54. Левченко В.А., Востоков Е.Н. Изучение разломных блоковых структур (на примере Балтийского и Северного морей) // Обзор ВИЭМС. Сер. геология и геофизика. 1979. 72 с.
55. Honkasalo T. Gravity and land upheaval in Fennoscandia // Ann. Acad. Sci. Fenn. Ser. A, 111, Geol.-Geograph., 1966. V. 90. P. 139–141.
56. Kiviniemi A. High precision measurements for studying the Secular Variation in Gravity in Finland. Helsinki. 1974. 68 p.
57. Kiviniemi A. Some results concerning crustal movements in Finland // Tectonoph. 1981. V. 71. N 1–4. P. 65–71.
58. Богданов В., Сильдвэ Х. О природе послеледникового поднятия Фенноскандии (в связи с изучением неприливных вариаций силы тяжести) // Изв. АН ЭССР. Сер. Геология. 1986. Т. 35. № 4. С. 137–145.
59. Ruotsalainen H. The Fennoscandian land uplift gravity lines – a tool for the Nordic geodynamical studies // Proc. of the 14th Gen. Meeting of the Nordic Geodetic Commission. Kirkkonummi: FGI. 2002. P. 107–110.
60. Суханов С.И. Масштабный эффект – неразгаданная угроза. М.: Новый центр. 2001. 68 с.

К статье *Богданов В. И., Малова Т. И. Проблемы современной концепции...*

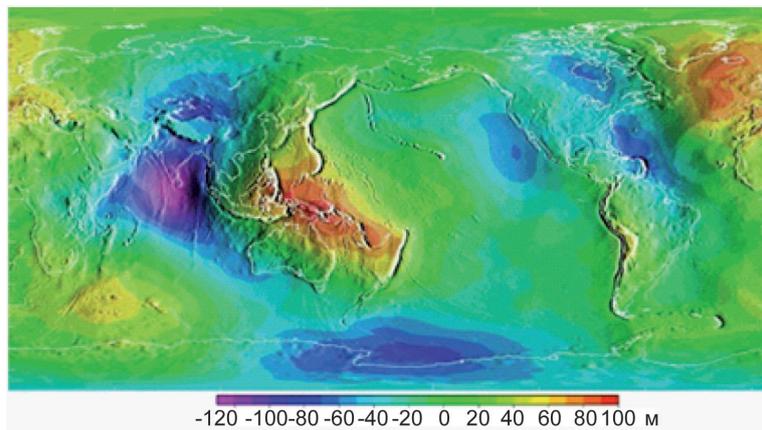


Рис. 3. Модель геоида Земли КА «GOCE» Европейского Космического Агентства [11].

К статье *Гольмиток А. Я. Многоканальное сейсмическое профилирование...*

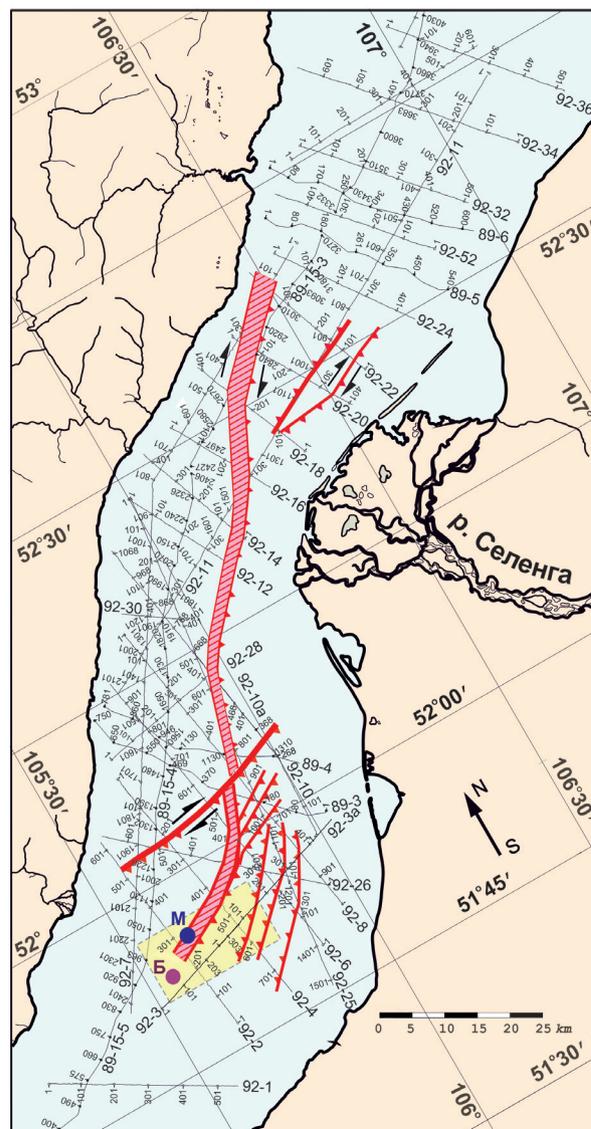


Рис. 1. Карта глубинных разломов фундамента на озере Байкал вблизи дельты р. Селенги. Малиновая заштрихованная полоса — уступ в рельефе поверхности фундамента, образованный древним разломом. Ограничивающая полоса красная линия — верхнее ребро уступа; красная линия с бергштрихами — нижнее ребро уступа с указанием направления падения сброса; черные полустрелки указывают направление смещения бортов сдвигового разлома; красные линии с бергштрихами — сбросы с указанием направления падения; синий кружок с литерой **М** — грязевой вулкан «Маленький»; фиолетовый кружок с литерой **Б** — грязевой вулкан «Большой»; тонкая линия с обозначением типа В92-4 — многоканальное сейсмическое профилирование; черточки на линиях с цифрами — пункты возбуждения упругих колебаний; светло-жёлтый прямоугольник — район детальных работ [12—14].