

Гравитационное поле Сарматии по спутниковым данным (модель EIGEN-6S2) и его интерпретация

О. А. Черная, Т. П. Егорова, 2021

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 марта 2021 г.

В работе приведен краткий обзор спутниковых наблюдений миссий CHAMP, GRACE и GOCE по изучению глобального гравитационного поля Земли и использованный для этого математический аппарат в виде разложения геопотенциала по сферическим функциям. Рассмотрено применение спутниковых данных в различных областях наук о Земле. В качестве базовой глобальной модели гравитационного поля Земли по спутниковым данным рассмотрена комбинированная модель EIGEN-6S2, объединяющая данные спутниковых миссий GRACE и GOCE, а также использующая данные спутников лазерной локации LAGEOS. На ее основе проанализировано гравитационное поле Сарматии с использованием аномалий в свободном воздухе, аномалий Буге, второй производной геопотенциала и высот геоида. Наиболее четко геологические структуры Сарматии и ее окружения проявились в аномалиях в свободном воздухе и распределении второй производной геопотенциала, демонстрирующих особенности гравитационного поля Украинского щита, Воронежского кристаллического массива и Припятско-Днепровско-Донецкой впадины (ПДДВ) с характерными аномалиями общего северо-западного простирания. Продолжение структуры ПДДВ в юго-восточном направлении через вал Карпинского в северную часть Каспийского моря свидетельствует о существовании протяженной древней тектонической зоны Сармато-Туранского линеамента. Геоид в пределах Сарматии отличается в целом региональным субширотным градиентным изменением от +40 м на западе до –10 м на востоке, определяется положением данной структуры между двумя его глобальными аномалиями — максимумом Северной Атлантики и минимумом Индийского океана.

Ключевые слова: спутниковая гравиметрия, модель гравитационного поля Земли, модель EIGEN-6S2, геоид, Сарматия.

Введение. Миссии CHAMP, GRACE и GOCE. Общеизвестно, что одной из основных задач физической геодезии является моделирование внешнего гравитационного поля Земли (ГПЗ). В последние годы стремительно развиваются космические методы геодезии благодаря реализации спутниковых проектов. Современные передовые технологии и высокоточные измерения с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) позволяют представлять глобальное ГПЗ и его вариации с лучшим пространственным и временным разрешением по сравнению с моделями глобального гравитационного поля перво-

го поколения, созданными с 1960 по 1990 г. [Ince et al, 2019].

Современные же требования геодезии и смежных наук к моделированию ГПЗ таковы [Seeber, 2003; Непоклонов, 2009; Сугаипова, 2011]: пространственное разрешение (длина полуволны) — 100 км, что соответствует степени $l_{\max} > 200$ в разложении геопотенциала по сферическим функциям; точность определения геоида порядка 1—2 см и аномалий силы тяжести порядка 1 мГал; временное разрешение модели — неделя и менее; длительность непрерывно производимых измерений — не менее 10 лет [Murbock et al., 2014], а в идеале — 11

лет для охвата полного солнечного цикла [Cesare et al., 2014].

Огромный вклад в улучшение моделирования глобального ГПЗ внесли реализованные в первой декаде XXI ст. специальные гравитационные миссии CHAMP [Reigber et al., 2002], GRACE [Tapley et al., 2004], GRACE Follow-On [Flechtner et al., 2014, 2016], GOCE [Migliaccio et al., 2011], и спутники SLR (спутниковая лазерная локация), такие как LAGEOS 1 и LAGEOS 2, а также альтиметрические спутники Торех/Poseidon и Jason 1 и 2.

Остановимся более подробно на специальных спутниковых проектах, посвященных уточнению глобального ГПЗ. Суть таких проектов заключается в том, что спутник выступает как высокоточный гравитационный зонд, способный ощутить малейшие изменения гравитационного поля Земли [Сугаипова, 2018]. Добиться этого можно только при условии выполнения трех базовых принципов [Seeber, 2003]: 1) минимально возможной высоты орбиты (от 200 до 500 км), 2) непрерывного прослеживания положения спутника в трех пространственных измерениях вдоль больших орбитальных дуг, 3) разделения гравитационных и негравитационных сил, воздействующих на спутник.

Существуют две концепции спутниковых проектов, основанные на этих базовых принципах (рис. 1): 1) межспутникового слежения (измерение дальности и скорости изменения дальности между двумя спутниками, это метод «спутник-спутник» или метод SST (Satellite-to-Satellite Tracking), использовался в проектах CHAMP и GRACE) и 2) спутниковая градиентометрия (измерение разностей силы тяжести в разных направлениях в пределах одного спутника, метод SGG (Satellite Gravity Gradiometry), проект GOCE).

Искусственный спутник Земли (ИСЗ) нового поколения **CHAMP** (CHALLENGING Mini-satellite Payload for geophysical research and application) западноевропейского (GFZ-Потсдам, Германия) проекта стартовал 15 июля 2000 г. с космодрома Плесецк, на близполярную круговую орбиту

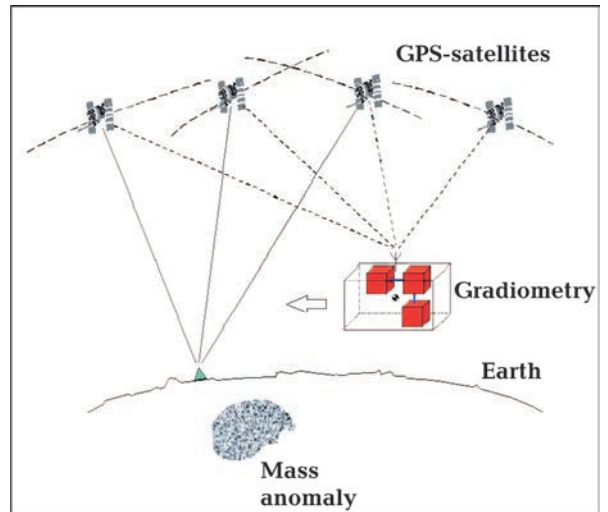


Рис. 1. Принцип наблюдений гравитационного поля Земли с использованием спутниковой градиентометрии и с помощью системы спутник-спутник.

Fig. 1. The principle of observations of the Earth's gravity field using satellite gradientometry and via a satellite-satellite system.

при начальной высоте 454 км. Основные цели этого проекта состояли в определении параметров ГПЗ в области низких и средних частот и изменении этих параметров со временем. После 10 лет работы на орбите CHAMP завершил свою миссию. С гравиметрической составляющей программы можно ознакомиться в работах [Reigber et al., 2002; Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2006].

Продолжением проекта CHAMP стала реализация совместного германо-американского проекта **GRACE** (Gravity Recovery And Climate Experiment) — эксперимента по исследованию гравитационного поля и климата с помощью двух спутников близнецов типа CHAMP с расстоянием ~220 км, запущенных с космодрома Плесецк 17 марта 2002 г. на близкие, почти круговые, близполярные орбиты с высотой 485 км. Основными измеряемыми величинами были расстояние между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных пролетами над притягивающими массами. Информация о бортовой аппаратуре спутников GRACE опубликована во многих работах, включая [Tapley et al., 2004; Hofmann-Wellenhof, Moritz,

2006]. Полученные в ходе проекта GRACE результаты успешно использовались для оперативного определения параметров геопотенциала в среднем и высоком диапазонах частот [Mayer-Gürr et al., 2018].

Основная научная цель миссии GRACE заключалась в измерении ГПЗ и его изменения во времени с беспрецедентно высокой точностью для изучения водных бассейнов, ледников и океанов. Повышение точности достигалось за счет использования двух спутников, следующих друг за другом по одной орбите. Измерения, выполненные в ходе миссии GRACE, позволили изучить вариации континентального гидрологического цикла, деградацию ледников в Гренландии и Антарктиде, процессы длинноволновой циркуляции океана и перенос тепла океаническими течениями к полюсам Земли. Таким образом, с момента запуска миссии GRACE в марте 2002 г. и до окончания в июне 2017 г. получен большой объем фундаментальных данных, позволяющий значительно улучшить сезонные и межгодовые оценки изменения климата. Кроме этого, в ходе миссии GRACE ежедневно определялись температура и пар по 150 глобально распределенным вертикальным профилям, данные которых круглосуточно доставлялись в различные метеорологические службы для прогноза погоды [<https://www.gfz-potsdam.de/grace/>]. В октябре 2017 года миссия была завершена. Спутниковый проект GRACE проработал более 15 лет (в три раза дольше, чем планировалось изначально) и внес решающий вклад в изучение системы Земли, что отразилось в более чем 1700 научных работах.

Концепция спутниковой градиентометрии, основанной на измерении разностей силы тяжести в пределах одного спутника, была успешно реализована в проекте Европейского Космического Агентства (European Space Agency, ESA) **GOCE** (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer). Искусственный спутник Земли GOCE был запущен 17 марта 2009 г. с космодрома Плесецк на сверхнизкую почти круговую солнечно-синхронную орбиту

с высотой 240—250 км. Этот гравиметрический проект предусматривал выполнение на сверхнизкой околоземной орбите бортовых измерений вторых производных гравитационного потенциала с помощью прецизионного бортового градиентометра и позволил построить как высокоточные модели ГПЗ (с пространственной разрешающей способностью (длиной полуволны) около 70 км и с точностью гравитационных аномалий 0,6—1 мГал при пространственном разрешении 100 км), так и фигуры геоида высокого разрешения (с погрешностью высот около 1—2 см при разрешении 100 км) [Pail et al., 2010a; Migliaccio et al., 2011; Brockmann et al., 2021; European Space Agency, ESA. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/goce>]. Эти модели дают возможность лучше изучить внутреннее строение Земли и динамические процессы, происходящие в коре и верхней мантии, в частности движение литосферных плит. В сочетании с имеющимися данными спутниковой альтиметрии, высокоточные глобальные модели геопотенциала также дают новую информацию для исследований процессов глобальной циркуляции вод Мирового Океана и связанных с ней изменений климата [Кащеев, 2015]. Отработав свой ресурс, спутник упал 11 ноября 2013 г. в океан. Несмотря на то, что его полет завершен, обширные данные GOCE продолжают использоваться в геофизике, геодезии, океанографии и гляциологии [Drinkwater et al., 2007; Brockmann, 2014; Brockmann et al., 2014, 2021].

Сферические гармоники и гравитационное поле. В основе представления ГПЗ по спутниковым данным лежит известное разложение гравитационного потенциала Земли V в любой точке (r, λ, φ) выше поверхности Земли в усеченный ряд по сферическим функциям (гармоникам):

$$V(r, \lambda, \varphi) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r}\right)^l P_{lm}(\sin \varphi) \times \\ \times (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda),$$

где r, λ, φ — сферические геоцентрические координаты расчетной точки (радиус, дол-

гота, широта); R — экваториальный радиус референц-эллипсоида (наиболее часто выбирают референц-эллипсоид WGS84 Всемирной геодезической системы 1984 г, использующийся также в глобальной системе позиционирования GPS); GM — произведение гравитационной постоянной и массы Земли; l, m — степень и порядок сферической гармоники; P_{lm} — полностью нормированные присоединенные функции Лежандра степени l и порядка m ; C_{lm}, S_{lm} — коэффициенты Стокса, полностью нормированные гармонические коэффициенты гравитационного потенциала Земли ($l \neq 0, m = 0$ — зональные гармоники, $l = m \neq 0$ — секторальные гармоники, $l \neq 0, m \neq 0$ — тессеральные гармоники).

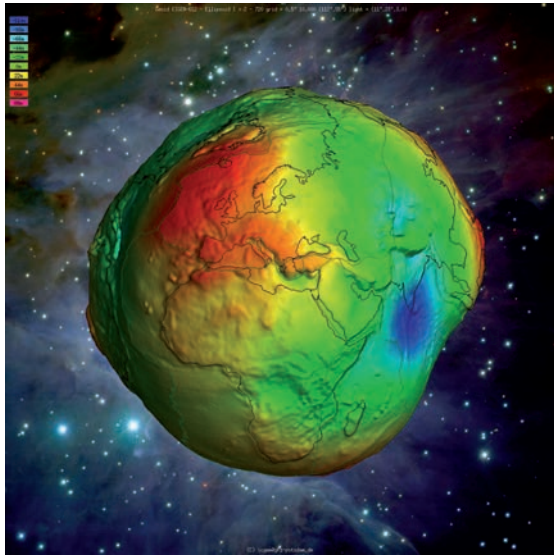
Более подробно о разложении геопотенциала в ряд по сферическим гармоникам можно ознакомиться в работах [Молоденский, 1960; Torge, 1989; Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2006].

Таким образом, задача уточнения гравитационного поля Земли сводится к поиску и уточнению коэффициентов Стокса, гармонических коэффициентов C_{lm}, S_{lm} , которые, фактически, и являются моделью геопотенциала вместе с параметрами GM и R .

Глобальная модель гравитационного поля по спутниковым данным EIGEN-6S2. На основании спутниковых измерений миссий CHAMP, GRACE и GOCE построены десятки моделей ГПЗ, которые используют данные как одного спутника, так и комбинации нескольких спутников. Приведем некоторые из них. По миссии CHAMP: EIGEN-1 (2002, 119 — год создания, максимальная степень и порядок сферической гармоники) [Reigber et al., 2002]; EIGEN-CHAMP05S (2010, 150) [Flechtner et al., 2010]. По миссии GRACE: GGM01S (2003, 120) [Tapley et al., 2003]; ITSG-Grace2018s (2019, 200) [Mayer-Gürr et al., 2018]. По миссии GOCE: GO_CONS_GSF_2_SPW_R1 (2010, 210) [Migliaccio et al., 2010]; GO_CONS_GSF_2_TIM_R6 (2019, 300) [Brockmann et al., 2021]. Особый интерес представляют модели гравитационного поля, которые используют данные

нескольких спутников, и тем самым дают дополнительную возможность улучшить свои характеристики во всех спектральных диапазонах. Например, в модели GOCO01S (2010, 224) по данным спутников GOCE и GRACE многолетние нормальные уравнения GRACE доминируют в комбинированном решении до степени и порядка 100, в то время как данные GOCE за 2 месяца вносят значительный вклад, начиная со степени и порядка 150 и выше. В диапазоне от 100 до 150 обе миссии перекрываются. По сравнению с моделями, полученными только по спутнику GOCE, их комбинация с GRACE приводит к значительному улучшению коэффициентов от низкой до средней степени [Pail et al., 2010b]. Характеристики более поздней комбинированной модели GO_CONS_GSF_2_DIR_R4 (2013, 260) по данным миссий GOCE, GRACE и LAGEOS были значительно улучшены, так как использовали в два раза большее количество данных миссии GOCE, которые, кроме того, имели лучшее качество благодаря переобработке Европейским космическим агентством (ESA) [Bruinsma et al., 2013].

Предметом нашего исследования является модель EIGEN-6S2 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques — Европейская улучшенная гравитационная модель Земли по новым методам) (2014, 260), также построенная по данным спутников GOCE, GRACE и LAGEOS-1/2 (Laser Geodynamics Satellite), что обеспечивает высокую точность от низкого до высокого разрешения [Rudenko et al., 2014]. Сферический спутник лазерной геодинимики LAGEOS-1 был разработан и запущен на орбиту высотой около 5850 км космическим агентством NASA в 1976 г.; LAGEOS-2 был создан Итальянским космическим агентством и запущен на орбиту высотой 5625 км совместно с NASA в 1992 г. Спутники вносят свой вклад в измерения очень низких степенных коэффициентов гравитационного поля благодаря качеству данных лазерного слежения, предоставленных Международной службой лазерной локации (International Laser Ranging



Service, ILRS) [Pearlman et al., 2002].

Модель EIGEN-6S2 имеет максимальную степень и порядок сферической гармоники $l_{\max}=260$, следовательно $(260+1)^2$ параметров, и содержит временные ряды для дрейфов, а также годовые и полугодовые вариации сферических колебаний с коэффициентами гармоник для степени 2—50 [Rudenko et al., 2014].

Пространственная разрешающая способность сферических гармоник (длина

Рис. 2. Модель геоида EIGEN-6S2 [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/].

Fig. 2. Geoid according to EIGEN-6S2 model [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/].

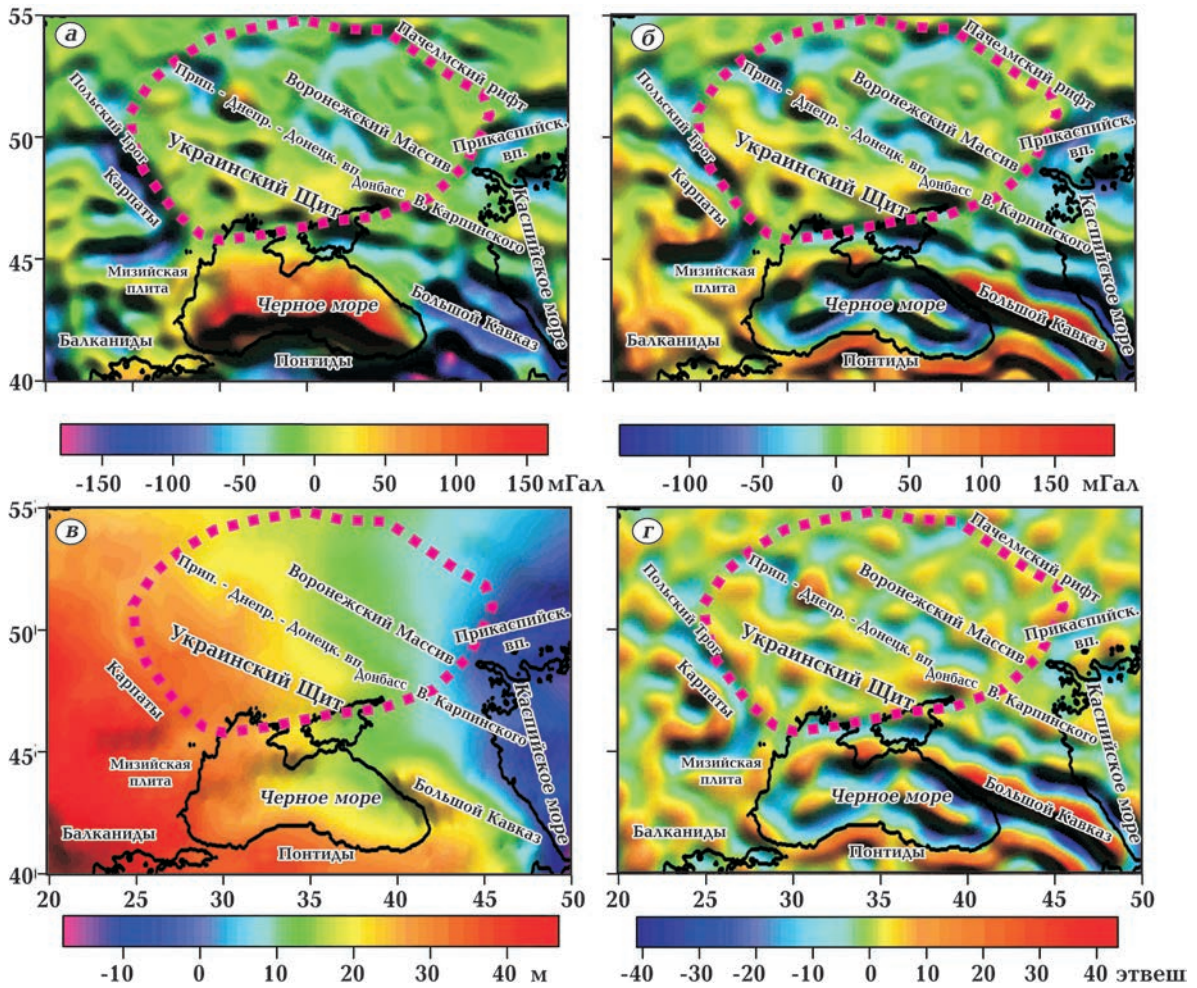


Рис. 3. Гравитационное поле Сарматии и окружающих структур по спутниковым данным модели EIGEN-6S2: аномалии Буге, мГал (а); аномалии в свободном воздухе, мГал (б); высоты геоида, м (в); вторая радиальная производная гравитационного потенциала, этвеш (г). Сарматия показана красной пунктирной линией.

Fig. 3. The gravity field of Sarmatia and surrounding units according to satellite data model EIGEN-6S2: Bouguer anomalies, mGal (a); Free Air anomalies, mGal (б); geoid heights, m (в); the second radial derivative of the gravity potential, etvessh (г). Sarmatia is outlined in red dotted line.

полуволны), а значит, и разрешающая способность модели $\psi_{\min}(l_{\max})$ рассчитывается по формуле

$$\psi_{\min}(l_{\max}) \approx \frac{\pi R}{l_{\max}},$$

где R — радиус референц-эллипсоида, а l_{\max} — max степень сферической гармоники.

Для рассматриваемой модели пространственная разрешающая способность составляет примерно 77 км на поверхности Земли. В градусах наибольшая детализация модели составляет примерно 0,692 градуса, что получено из известного соотношения:

$$\psi_{\min}(l_{\max}) \approx \frac{180^\circ}{l_{\max}}.$$

EIGEN-6S2 — это чисто спутниковая

модель ГПЗ, которая использует данные двух независимых спутниковых миссий и представляет собой последовательную комбинацию информации GRACE и GOCE на уровне нормальных уравнений, которые не содержат априорной информации о гравитационном поле. Поэтому такую чистую модель можно использовать для независимого сравнения с данными наземного гравитационного поля, а затем для последующего объединения спутниковых и наземных данных. В океанах можно получить чистый геоид с высоким разрешением, высоты которого не зависят от альтиметрии. Такой геоид представляет большой интерес для океанографии и изучения динамической топографии океана. На рис. 2 показана форма геоида модели EIGEN-6S2. Для наглядности высоты геоида умножились на так называемый

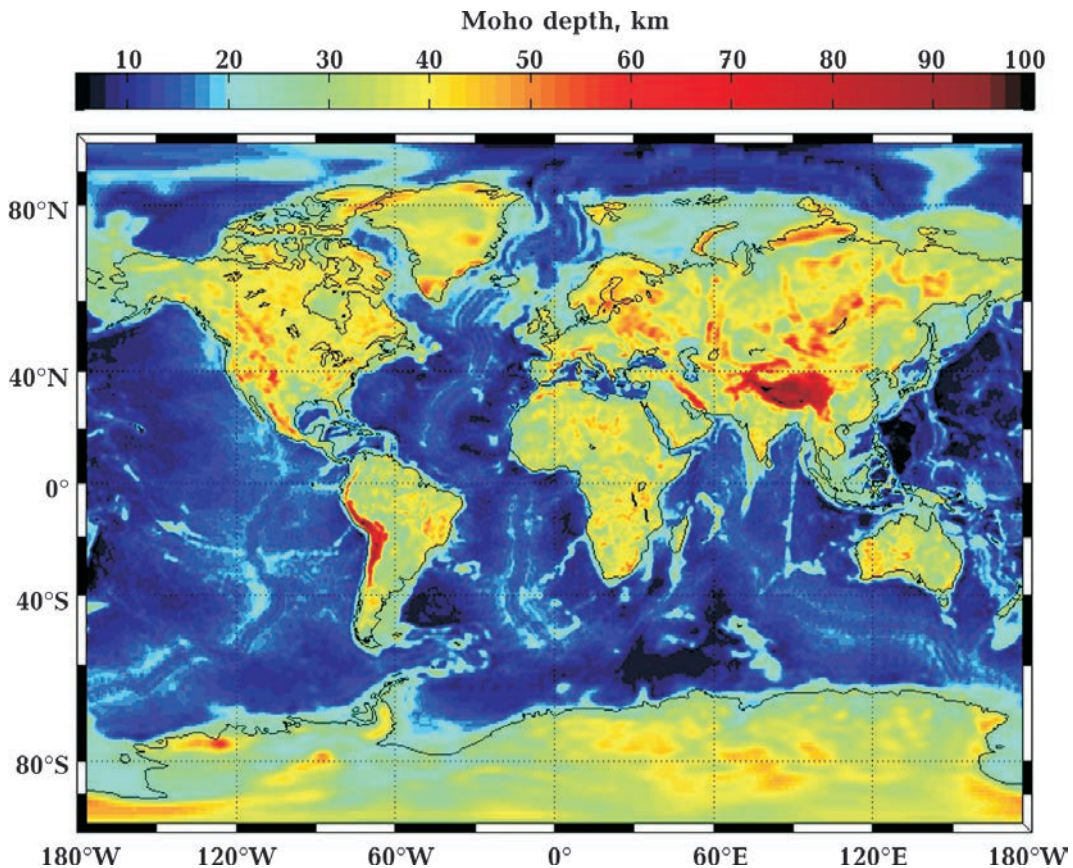


Рис. 4. Глобальная модель глубин поверхности Мохо, полученной в рамках проекта GEMMA [Reguzzoni, Sampietro, 2015].

Fig. 4. Global model of the Moho depths, resulting in the GEMMA project [Reguzzoni, Sampietro, 2015].

радиальный «коэффициент усиления», равный 10 000.

Гравитационное поле Сарматии (по данным глобальной модели EIGEN-6S2). Рассмотрим гравитационное поле по данным спутниковых наблюдений глобальной модели EIGEN-6S2 на примере Сарматии. На рис. 3 показаны распределения аномалий Буге и аномалий в свободном воздухе, высот геоида и второй вертикальной производной гравитационного потенциала для территории Сарматии и окружающих структур. Сарматия является южным сегментом, который вместе с двумя другими — Волго-Уралией и Фенноскандией образуют Восточно-Европейский кратон [Bogdanova, 1993]. Сарматия отделена от Волго-Уралии Пачелмским авлакогеном (рифтом), а от Фенноскандии — сложно-устроенной шовной зоной, проходящей вдоль Осницко-Микашевичского интрузивного пояса, перекрытого осадками Припятского прогиба.

Наиболее четко структура Сарматии выделяется в аномалиях в свободном воздухе (рис. 3, б), которые показывают доминирующее положение Украинского щита (УЩ), с положительными аномалиями до 40 мГал широтного в центральной и восточной частях и северо-западного простирания в северо-западной части щита на фоне гравитационных аномалий Воронежского массива, близких к нулю. Разделяющая УЩ и Воронежский массив линейная структура Припятско-Днепровско-Донецкой впадины (ПДДВ) общего северо-западного простирания выделяется аномалиями разного знака, включающими минимум Припятского прогиба и соседствующий с ним интенсивный Черниговский максимум, Днепровский грабен с гравитационными аномалиями, изменяющимися от положительных (+40 мГал) в его северо-западной части к отрицательным значениям (–30 мГал) в юго-восточной. Над Донбасским складчатым сооружением зафиксирован четкий широтный максимум величиной 40 мГал. Следует отметить, что распределение аномалий в свободном воздухе (см. рис. 3, б) свидетельствует о

продолжении структуры ПДДВ в юго-восточном направлении в пределы вала Карпинского и далее в северную часть Каспийского моря, подтверждая таким образом существование более протяженной древней тектонической зоны Сармато-Туранского линеамента [Айзберг и др., 1971] — крупнейшего пояса планетарных разломов и дислокаций северо-западного простирания. С северо-востока Сарматия отделена от Волго-Уралии Пачелмским рифтом с линейным гравитационным минимумом северо-западного простирания, переходящим в обширную отрицательную аномалию Прикаспийской впадины.

В целом для Сарматии и особенно более молодых структур южного обрамления характерно северо-западное простирание гравитационных аномалий, что особенно выразилось в распределении второй производной гравитационного потенциала (рис. 3, г). Так, Черное море отражается в поле аномалий в свободном воздухе четким минимумом с двумя локальными максимумами в западной и восточной частях моря, а в аномалиях Буге Черноморская впадина выделяется обширным максимумом амплитудой до 170 мГал (рис. 3, а, б). А орогенам Большого Кавказа, Карпат, Понтид и Балканид соответствуют вытянутые максимумы аномалий в свободном воздухе и, соответственно, минимумы аномалий Буге, с сильными градиентами второй производной гравитационного потенциала (рис. 3, а, б, г).

Распределение высот геоида в пределах нашей площади (рис. 3, в) характеризуется общим градиентным ростом от положительных высот геоида (+45 м) на западе (в районе зоны Тейсейре—Торнквиста и западнее Черного моря) к отрицательным значениям (–15 м) на востоке (в Каспийском море и Прикаспийской впадине), составляя таким образом диапазон изменений геоида 60 м. Такой градиентный характер поверхности геоида определяется положением Сарматии между двумя сильными планетарными аномалиями геоида — Северо-Атлантического максимума и минимума Индийского океана (рис. 2). По

данным сейсмологии и больших взрывов крупная положительная аномалия геоида с центром в Северной Атлантике связана с подъемом поверхности переходной зоны между верхней и нижней мантией [England et al., 1978; Павленкова, 2003]. В работе [Bott, 1971] показано, что такую же природу имеют и другие наиболее крупные аномалии геоида. Природа минимума геоида Индийского океана по данным глобальной сейсмической томографии и численного моделирования связана также с процессами в мантии — присутствием низкоскоростных аномалий в верхней мантии и возможными аномалиями пониженной плотности между верхней и средней мантией, а также аномальной конвекцией в нижней мантии [Chase, 1979; Rao, Kumar, 2014; Ghosh et al., 2017].

Использование спутниковых данных.

Материалы съемок системой GRACE показали высокую перспективность этого нового спутникового метода для решения гидрологических задач [Khan et al., 2013], задач гляциологии и др. [Jacob et al., 2012; Moholdt et al., 2012; Velicogna et al., 2014]. При этом особенно ярко проявились изменения, связанные с дегляциацией покровных ледников Антарктиды, Гренландии, архипелагов северных морей [Chen et al., 2006; Moholdt et al., 2012; Velicogna et al., 2014].

Была показана значимая статистическая связь между ГПЗ и продуктивной влажностью почв [Киселев и др., 2016]. Ежемесячно за весь период эксплуатации спутников GRACE с геометрическим разрешением $\sim 110 \times 110$ км построены глобальные карты вариаций ГПЗ, пересчитанные в толщину эффективного слоя влажности, что позволило сделать их анализ в связи с такими опасными природными явлениями, как наводнения, засухи и др. [Киселев и др., 2016]. Этими авторами рассмотрены проявления засухи и ее последствий в бассейне р. Волги и на Ближнем Востоке и сделан вывод о значимом влиянии техногенного фактора на снижение уровня оз. Байкал, а на примере аномально высокого подъема уровня воды в нижнем течении р. Амур Киселевым с соавторами [Киселев и др.,

2016] показаны возможности метода при прогнозировании паводков.

Для территории Финляндии выполнено сравнение гравитационных аномалий (в свободном воздухе), полученных по данным наземных съемок, с данными спутниковых наблюдений [Saari, Bilker-Koivula, 2015]. При этом рассматривались глобальные спутниковые модели GOCE, GRACE и объединенная модель GOCE+GRACE. Лучшие результаты показала последняя объединенная модель на момент производимых исследований EIGEN-6S2 (степени и порядка 260) с разницей 10 мГал по сравнению с наземными данными и разницей по высоте 15—20 см.

Вариации ГПЗ за время функционирования GRACE, обусловленные динамическими процессами в литосфере и мантии Земли, отметили послеледниковое поднятие Балтийского щита [Steffen et al., 2009] и катастрофическое землетрясение в Индонезии 2004 г., связанное с заметным смещением литосферных плит [Panet et al., 2010].

Запуск спутника GOCE в 2009 г., оборудованного трехосным градиентометром, предоставил уникальную возможность изучить ГПЗ и геоид с беспрецедентной точностью в глобальном масштабе [Drinkwater et al., 2007], что значительно расширило наши знания о работе системы Земли. В этом смысле получены значительные результаты при построении глобальных и региональных моделей глубин Мохо [Reguzzoni et al., 2013; Marani et al., 2013; Sampietro et al., 2014], изучении континентов и крупных геологических структур [Ebbing et al., 2018; Braitenberg, 2014, 2015], а также сильных землетрясений [Yong-zhi et al., 2011; Sabadini, Cambiotti, 2013].

При обработке гравитационных данных спутника GOCE был предложен проект GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications) Европейского космического агентства, основной целью которого является оценка границы между земной корой и мантией (Мохо) по данным GOCE. Карта Мохо GEMMA основана на инверсии однородных, хорошо распреде-

ленных гравиметрических данных, что позволило впервые оценить глубину Мохо во всем мире с хорошим разрешением, включая районы, где отсутствуют наземные гравиметрические данные.

В рамках проекта GEMMA была разработана новая глобальная модель земной коры по данным наблюдений гравитационного поля GOCE. Эта модель имеет разрешение $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и состоит из семи слоев, описывающих геометрию и плотность океанов, ледниковых щитов, трех слоев осадочных отложений, кристаллической коры и верхней мантии. В результате была построена глобальная модель Мохо (рис. 4), которая хорошо согласуется с фактическим гравитационным полем, преодолевая таким образом одно из основных ограничений глобальных моделей, полученных из сейсмических наблюдений [Sampietro et al., 2013; Reguzzoni, Sampietro, 2015], поскольку сейсмическая модель Мохо не проверялась на соответствие гравитационному полю.

Заключение. В связи с большим прогрессом, наблюдаемым в последние десятилетия в изучении гравитационного поля Земли из космоса, выполнен краткий обзор спутниковых наблюдений миссий CHAMP, GRACE и GOCE, приведен использующийся математический аппарат в виде разложения геопотенциала по сферическим функциям и рассмотрено применение спутниковых данных в различных областях наук о Земле.

В качестве базовой глобальной модели гравитационного поля Земли по спутниковым данным рассмотрена комбинированная модель EIGEN-6S2 [Rudenko et al., 2014] с разложением геопотенциала до 260 гармоник (степени и порядка), объединяющая спутниковые миссии GRACE и GOCE и использующая данные спутников лазерной

геодинамики LAGEOS. На основе модели EIGEN-6S2 выполнен анализ гравитационного поля Сарматии с использованием аномалий в свободном воздухе, аномалий Буге, второй производной геопотенциала и высот геоида.

Геологические структуры Сарматии и ее окружения лучше всего проявились в распределении длинноволновой компоненты аномалий в свободном воздухе, показывающей различия в характере гравитационного поля Украинского щита, Воронежского массива и разделяющей их Припятско-Днепровско-Донецкой впадины. Для гравитационного поля Сарматии характерны в целом аномалии северо-западного простирания, которые наиболее четко отразились в распределении второй производной геопотенциала. Распределение высот геоида на территории Сарматии имеет градиентный характер, что определяется положением области исследований между двумя глобальными аномалиями геоида — максимумом Северной Атлантики и минимумом Индийского океана.

В следующих статьях более детально рассмотрим гравитационное поле Сарматии по данным глобальных моделей нового поколения, которые, помимо спутниковых данных, учитывают и наземные измерения. В частности, комбинированная модель EIGEN-6C4 имеет максимальную степень и порядок сферической гармоник 2190 и по своему разрешению близка к глобальной гравитационной модели EGM 2008. Другим направлением наших исследований, представляющим несомненный интерес для нашего региона, является анализ модели подошвы коры (поверхности Мохо), построенной в рамках проекта GEMMA [Sampietro et al., 2013; Reguzzoni, Sampietro, 2015] по глобальной модели коры с учетом сейсмических данных.

Список литературы

- Айзберг Р. Е., Гарецкий Р. Г., Синичка А. М. Сармато-Туранский линеймент земной коры. В кн.: Проблемы теоретической и региональной тектоники. Москва: Наука, 1971. С. 41—51.
- Кащеев Р. А. Современные методы спутниковой гравиметрии. Конспект лекций. Казань: Изд. Казан. гос. ун-та, 2015. 45 с.
- Киселев А. В., Горный В. И., Крицук С. Г., Тро-

- нин А. А. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 6. С. 13—28. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28.
- Молоденский М. С., Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. Труды ЦНИИГАиК. 1960. № 131. 252 с.
- Непоклонов В. Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования (часть 1, 2). *Автоматизированные технологии изысканий и проектирования*. 2009. № 2(33), № 3(34). Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/journal.aspx>.
- Павленкова Н. И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества. В кн.: Проблемы глобальной геодинамики. Ред. Д. В. Рунквист. Москва: Изд-во РАН, 2003. С. 168—182.
- Сайт Немецкого исследовательского центра наук о Земле (Потсдам). Режим доступа: <https://www.gfz-potsdam.de/grace/>; <https://www.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
- Сайт Европейского Космического Агентства «Earth online». Режим доступа: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/goce>.
- Сугаипова Л. С. Разработка и исследование методов разномасштабного моделирования геопотенциала: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2018. 325 с.
- Сугаипова Л. С. Сравнение современных моделей глобального гравитационного поля Земли. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотоъемка*. 2011. № 6. С. 14—20.
- Bogdanova, S. V. (1993). Segments of the East European Craton. In D. G. Gee, M. Beckholmen (Eds.), *EUROPROBE in Jablonna 1991* (pp. 33—38). Warszawa: Institute of Geophysics. Polish Acad. of Sci. European Sciences Foundation.
- Bott, M.H.P. (1971). The mantle transition zone as a possible source of global gravity anomalies. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 28—34. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90137-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90137-3).
- Braitenberg, C. A. (2014). A Grip on Geological Units with GOCE. In: U. Marti (Ed.), *Gravity, Geoid and Height Systems. International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 141, pp. 309—317). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10837-7_39.
- Braitenberg, C. A. (2015). Exploration of tectonic structures with GOCE in Africa and across continents. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 88—95. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.013>.
- Brockmann, J. M. (2014). On High Performance Computing in Geodesy — Applications in Global Gravity Field Determination. Phd thesis, Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn. No. 22.
- Brockmann, J. M., Zehentner, N., Hock, E., Pail, R., Loth, I., Mayer-Gurr, T., & Schuh, W. D. (2014). EGM_TIM_RL05: An independent geoid with centimeter accuracy purely based on the GOCE mission. *Geophysical Research Letters*, 41(22), 8089—8099. <https://doi.org/10.1002/2014gl061904>.
- Brockmann, J. M., Schubert, T., & Schuh, W. D. (2021). An Improved Model of the Earth's Static Gravity Field Solely Derived from Reprocessed GOCE Data. *Surveys in Geophysics*, 42, 277—316. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09626-0>.
- Bruinsma, S. L., Forste, C., Abrikosov, O., Marty, J. C., Rio, M. H., Mulet, S., & Bonvalot, S. (2013). The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3607—3612. <https://doi.org/10.1002/grl.50716>.
- Cesare, S., Allasio, A., Anselmi, A., Dionisio, S., Massotti, L., Mottini, S., Parish, M., Silvestrin, P. (2014). From GOCE to the Next Generation Gravity Mission. *5th International GOCE User Workshop. UNESCO. November 2014, Paris, France*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/280075591_From_GOCE_to_the_Next_Generation_Gravity_Mission.
- Chase, C. G. (1979). Subduction, the geoid, and lower mantle convection, *Nature*, 282, 464—468. <https://doi.org/10.1038/282464a0>.
- Chen, J. L., Tapley, B. D., & Wilson, C. R. (2006). Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry. *Earth and Planetary Sci-*

- ence Letters*, 248(1-2), 368—378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039>.
- Drinkwater, M. R., Haagmans, R., Muzi, D., Popescu, A., Floberghagen, R., Kern, M. & Fehringner, M. (2007). The GOCE gravity mission: ESA's first core Earth explorer. *Proc. of the 3rd international GOCE user workshop, November 6—8, 2006. Frascati, Italy, ESA SP-627*.
- Ebbing, J., Haas, P., Ferraccioli, F., Pappa, F., Szwillus, W., & Bouman, J. (2018). Earth tectonics as seen by GOCE — Enhanced satellite gravity gradient imaging. *Scientific Reports*, 8, 16356. doi: 10.1038/s41598-018-34733-9.
- England, P., Kennet, B., & Worthington, M. (1978). A comparison of the upper mantle structure beneath Eurasia and the North Atlantic and Arctic Oceans. *Geophysical Journal International*, 54(3), 575—585. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb05495.x>.
- Flechtner, F., Dahle, C., Neumayer, K. H., König, R., & Förste, C. (2010) The Release 04 CHAMP and GRACE EIGEN Gravity Field Models. In: F. Flechtner et al. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques* (pp. 41—58). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10228-8_4.
- Flechtner, F. (2014). LOTSE-CHAMP/GRACE: An Interdisciplinary Research Project for Earth Observation from Space. In: F. Flechtner, N. Sneeuw, W. D. Schuh (Eds.), *Observation of the System Earth from Space — CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Advanced Technologies in Earth Sciences* (pp. 3—8). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32135-1_1.
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., & Güntner, A. (2016). What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? *Surveys in Geophysics*, 37, 453—470. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>.
- Ghosh, A., Thyagarajulu, G., & Steinberger, B. (2017). The importance of upper mantle heterogeneity in generating the Indian Ocean Geoid Low. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9707—9715, <https://doi.org/10.1002/2017GL075392>.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer, 420 p.
- Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., & Schuh, H. (2019). ICGEM — 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. *Earth System Science Data*, 11, 647—674. <http://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.
- Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W. T., & Swenson, S. (2012). Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482, 514—518. <https://doi.org/10.1038/nature10847>.
- Khan, H. H., Khan, A., Shakeel, A., Gennero, M.-C., Minh, K. D., & Cazenave, A. (2013). Terrestrial water dynamics in the lower Ganges — estimates from ENVISAT and GRACE. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 3693—3702. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0629-z>.
- Mariani, P., Braitenberg, C. & Ussami, N. (2013). Explaining the thick crust in Paraná basin, Brazil, with satellite GOCE-gravity observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 209—223. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.008>.
- Mayer-Gürr, T., Behzadpur, S., Ellmer, M., Kvas, A., Klinger, B., Strasser, S., & Zehentner, N. (2018). *ITSG-Grace2018: Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2018.003>.
- Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Sanso, F., Tscherning, C. C., Veicherts, M. (2010). *GOCE data analysis: the space-wise approach and the first space-wise gravity field model*. ESA Publications Division, Norwijk, The Netherlands, Bergen, Norway.
- Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Gatti, A., Sansò, F., & Herceg, M. (2011). *A GOCE-only global gravity field model by the space-wise approach*. Poster session presented at European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Austria.
- Moholdt, G., Wouters, B., & Gardner, A. S. (2012). Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic. *Geophysical Research Letters*, 39(10), L10502. <https://doi.org/10.1029/2012GL051466>.
- Murbock, M., Gruber, Th., Baldesarra, M., Brieden, P., Daras, I., Danzmann, K., Doll, B., Feili, D., Flechtner, F., Flury, J., Heinzl, G., Iran-Pour, S., Kusche, J., Langemann, M., Lö-

- cher, A., Müller, J., Müller, V., Naeimi, M., Pail, R., Raimondo, J.-C., Reiche, J., Reubelt, T., Sheard, B., Sneeuw, N., & Wang, X. (2014). Next Generation Satellite Gravimetry Mission Study. *5th International GOCE User Workshop. UNESCO. November 2014, Paris, France.*
- Pail, R., Goiginger, H., Mayrhofer, R., Schuh, W., Brockmann, J. M., Krasbutter, I., Hoeck, E., & Fecher, T. (2010a). GOCE gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method. *ESA Publications Division, Norwijk, The Netherlands, Bergen, Norway.*
- Pail, R., Goiginger, H., Schuh, W. D., Höck, E., Brockmann, J. M., Fecher, T., Gruber, T., Mayer-Gürr, T., Kusche, J., Jäggi, A., & Rieser, D. (2010b). Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20314, <https://doi.org/10.1029/2010gl044906>.
- Panet, I., Pollitz, F., Mikhailov, V., Diament, M., Banerjee, P., & Grijalva, K. (2010). Upper mantle rheology from GRACE and GPS post seismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(6), Q06008. <https://doi.org/10.1029/2009GC002905>.
- Pearlman, M., Degnan, J., & Bosworth, J. (2002). The International Laser Ranging Service. *Advances in Space Research*, 30(2), 135—143. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00277-6).
- Rao, B. P., & Kumar, M. R. (2014). Seismic evidence for slab graveyards atop the core mantle boundary beneath the Indian Ocean Geoid Low. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 236, 52—59, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.08.005>.
- Reguzzoni, M., Sampietro, D., & Sansò, F. (2013). Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. *Geophysical Journal International*, 195(1), 222—237. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt247>.
- Reguzzoni, M., & Sampietro, D. (2015). GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 31—43. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.002>.
- Reigber, C., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R., Bode, A., Lemoine, J.-M., König, R., Loyer, S., Neumayer, H., Marty, J.-C., Barthelmes, F., Perosanz, F., & Zhu Yuan, S. (2002). A high-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S); *Geophysical Research Letters*, 29(14), 37-1—37-4. <https://doi.org/10.1029/2002gl015064>.
- Rudenko, S., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Förste, C., Lemoine, J.-M., Ablain, M., Alexandre, D., & Neumayer, K.-H. (2014). Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends. *Advances in Space Research*, 54(1), 92—118. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.010>.
- Saari, T., & Bilker-Koivula, M. (2015). Evaluation of GOCE-based Global Geoid Models in Finnish Territory. *Newton's Bulletin*, (5), 25—36.
- Sabadini, R., & Cambiotti, G. (2013). The 2011 Tohoku-Oki earthquake GCMT solution from the GOCE model of the Earth's crust. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(3), 335—346. <https://doi.org/10.4430/bgta0110>.
- Sampietro, D., Reguzzoni, M., & Negretti, M. (2013). The GEMMA crustal model: first validation and data distribution. *Proceedings of the ESA Living Planet symposium, Edinburgh, United Kingdom, 2014b (ESA SP-722, December 2013).*
- Sampietro, D., Reguzzoni, M., & Braitenberg, C. (2014). The GOCE estimated Mohobeneath the Tibetan Plateau and Himalaya. In C. Rizos, P. Willis (Eds.), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet* (Vol. 139, pp. 391—397). International Association Geodesy Symposia. Springer.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 612 p.
- Steffen, H., Gitlein, O., Denker, H., Müller, J., & Timmen, L. (2009). Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry. *Tectonophysics*, 474, 69—77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
- Tapley, B. D., Chambers, D. P., Bettadpur, S., & Ries, J. C. (2003). Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid. *Geophysical Research Letters*, 30(22), 2163. <https://doi.org/10.1029/2003gl018622>.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reig-

- ber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09607. <https://doi.org/10.1029/2004gl019920>.
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 465 p.
- Velicogna, I., Sutterley, T. C., & van den Broeke, M. R. (2014). Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophysical Research Letters*, 41(22), 8130—8137. <https://doi.org/10.1002/2014GL061052>.
- Yong-zhi, Z., Hai-jun, X., Wei-Dong, W., Hu-rong, D. & Ben-ping, Z. (2011). Gravity anomaly from satellite gravity gradiometry data by GOCE in Japan Ms9.0 strong earthquake region. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 529—534. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.086>.

Gravity field of Sarmatia according to satellite data (model EIGEN-6S2) and its interpretation

O. A. Chornaya, T. P. Yegorova, 2021

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The paper presents a brief overview of satellite observations of the CHAMP, GRACE and GOCE missions to study the Earth's global gravity field, and the used mathematical apparatus in the form of an expansion of the geopotential in spherical harmonics. The application of satellite data in various fields of Earth Sciences is considered. As a basic global model of the Earth's gravity field based on satellite data we used the EIGEN-6S2 model [Rudenko et al, 2014] that combines satellite mission data GRACE and GOCE, and also uses satellite data of LAGEOUS laser ranging. On its basis, the gravity field of Sarmatia was analyzed using the Free Air anomalies, Bouguer anomalies, the second radial derivative of the geopotential and the geoid heights. The geological units of Sarmatia and its surroundings are most clearly manifested in the Free Air anomalies and in the distribution of the second derivative of the geopotential, showing differences in the gravity field pattern of the Ukrainian Shield, the Voronezh Massif, and the Pripyat-Dnieper-Donets basin (PDDB) with characteristic anomalies of the general northwest strike. The continuation of the PDDB in a southeastern direction through the Karpinsky Swell to the northern part of the Caspian Sea confirms the existence of an extended ancient tectonic zone of the Sarmato-Turanian lineament. The geoid within Sarmatia shows in general a regional west-east gradient change from +40 m in the west to -10 m in the east. Such large-scale geoid changes are determined by the Sarmatia position between two global geoid anomalies — the maximum of the North Atlantic and the minimum of the Indian Ocean.

Key words: satellite gravimetry, Earth's gravity field model, model EIGEN-6S2, geoid, Sarmatia.

References

- Ayzberg, R. E., Garetskiy, R. G., Sinichka, A. M. (1971). Sarmato-Turanian lineament of the earth's crust. In *Problems of theoretical and regional tectonics* (pp. 41—51). Moscow: Nauka (in Russian).
- Kashcheev, R. A. (2015). Modern methods of satellite gravimetry. Lecture notes. Kazan: Edition of Kazan State University, 45 p. (in Russian)
- Kiselev, A. V., Gornyy, V. I., Kritsuk, S. G., & Troinin, A. A. (2016). Indication of natural hazards using terrestrial gravity field variations observed by grace system. *Sovremennyye prob-*

- lemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 13(6), 13—28. doi: 10.21046 / 2070-7401-2016-13-6-13-28 (in Russian).
- Molodenskiy, M. S., Eremeev, V. F., & Yurkina, M. I. (1960). Methods for studying the external gravitational field and the figure of the Earth. *Proceedings of TsNIIGAiK*, (131), 252 p. (in Russian).
- Nepoklonov, V. B. (2009). On the use of new models of the Earth's gravitational field in automated survey and design technologies (part 1, 2). *Avtomatizirovannyye tekhnologii izyskaniy i proyektirovaniya*, (2-3). Retrieved from <http://www.credo-dialogue.com/journal.aspx> (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. (2003). The structure of the earth's crust and upper mantle and the mechanism of movement of deep-seated matter. In D. V. Runkquist (Ed.), *Problems of global geodynamics* (pp. 168—182). Moscow: RAS Publishing House (in Russian).
- Website of GFZ German Research Centre for Geosciences (Potsdam). Retrieved from <https://www.gfz-potsdam.de/grace/>; <https://www.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
- Website of European Space Agency, ESA «Earth online». Retrieved from <https://earth.esa.int/eogateway/missions/goce>.
- Sugaipova, L. S. (2018). Development and research of methods for multi-scale modeling of the geopotential. *Doctor's thesis*. Moscow, 325 p. (in Russian).
- Sugaipova, L. S. (2011). Comparison of modern models of the Earth's global gravitational field. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosyemka*, (6), 14—20 (in Russian).
- Bogdanova, S. V. (1993). Segments of the East European Craton. In D. G. Gee, M. Beckholmen (Eds.), *EUROPROBE in Jablonna 1991* (pp. 33—38). Warszawa: Institute of Geophysics. Polish Acad. of Sci. European Sciences Foundation.
- Bott, M.H.P. (1971). The mantle transition zone as a possible source of global gravity anomalies. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 28—34. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90137-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90137-3).
- Braitenberg, C. A. (2014). A Grip on Geological Units with GOCE. In: U. Marti (Ed.), *Gravity, Geoid and Height Systems. International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 141, pp. 309—317). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10837-7_39.
- Braitenberg, C. A. (2015). Exploration of tectonic structures with GOCE in Africa and across-continentals. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 88—95. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.013>.
- Brockmann, J. M. (2014). On High Performance Computing in Geodesy — Applications in Global Gravity Field Determination. Phd thesis, Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn. No. 22.
- Brockmann, J. M., Zehentner, N., Hock, E., Pail, R., Loth, I., Mayer-Gurr, T., & Schuh, W. D. (2014). EGM_TIM_RL05: An independent geoid with centimeter accuracy purely based on the GOCE mission. *Geophysical Research Letters*, 41(22), 8089—8099. <https://doi.org/10.1002/2014gl061904>.
- Brockmann, J. M., Schubert, T., & Schuh, W. D. (2021). An Improved Model of the Earth's Static Gravity Field Solely Derived from Reprocessed GOCE Data. *Surveys in Geophysics*, 42, 277—316. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09626-0>.
- Bruinsma, S. L., Forste, C., Abrikosov, O., Marty, J. C., Rio, M. H., Mulet, S., & Bonvalot, S. (2013). The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3607—3612. <https://doi.org/10.1002/grl.50716>.
- Cesare, S., Allasio, A., Anselmi, A., Dionisio, S., Massotti, L., Mottini, S., Parish, M., Silvestrin, P. (2014). From GOCE to the Next Generation Gravity Mission. *5th International GOCE User Workshop. UNESCO. November 2014, Paris, France*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/280075591_From_GOCE_to_the_Next_Generation_Gravity_Mission.
- Chase, C. G. (1979). Subduction, the geoid, and lower mantle convection, *Nature*, 282, 464—468. <https://doi.org/10.1038/282464a0>.
- Chen, J. L., Tapley, B. D., & Wilson, C. R. (2006). Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2), 368—378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039>.

- Drinkwater, M. R., Haagmans, R., Muzi, D., Popescu, A., Floberghagen, R., Kern, M. & Fehringner, M. (2007). The GOCE gravity mission: ESA's first core Earth explorer. *Proc. of the 3rd international GOCE user workshop, November 6—8, 2006. Frascati, Italy, ESA SP-627.*
- Ebbing, J., Haas, P., Ferraccioli, F., Pappa, F., Szwillus, W., & Bouman, J. (2018). Earth tectonics as seen by GOCE — Enhanced satellite gravity gradient imaging. *Scientific Reports*, *8*, 16356. doi: 10.1038/s41598-018-34733-9.
- England, P., Kennet, B., & Worthington, M. (1978). A comparison of the upper mantle structure beneath Eurasia and the North Atlantic and Arctic Oceans. *Geophysical Journal International*, *54*(3), 575—585. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb05495.x>.
- Flechtner, F., Dahle, C., Neumayer, K. H., König, R., & Förste, C. (2010) The Release 04 CHAMP and GRACE EIGEN Gravity Field Models. In: F. Flechtner et al. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques* (pp. 41—58). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10228-8_4.
- Flechtner, F. (2014). LOTSE-CHAMP/GRACE: An Interdisciplinary Research Project for Earth Observation from Space. In: F. Flechtner, N. Sneeuw, W. D. Schuh (Eds.), *Observation of the System Earth from Space — CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Advanced Technologies in Earth Sciences* (pp. 3—8). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32135-1_1.
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., & Güntner, A. (2016). What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? *Surveys in Geophysics*, *37*, 453—470. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>.
- Ghosh, A., Thyagarajulu, G., & Steinberger, B. (2017). The importance of upper mantle heterogeneity in generating the Indian Ocean Geoid Low. *Geophysical Research Letters*, *44*(19), 9707—9715, <https://doi.org/10.1002/2017GL075392>.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer, 420 p.
- Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., & Schuh, H. (2019). ICGEM — 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. *Earth System Science Data*, *11*, 647—674. <http://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.
- Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W. T., & Swenson, S. (2012). Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, *482*, 514—518. <https://doi.org/10.1038/nature10847>.
- Khan, H. H., Khan, A., Shakeel, A., Gennero, M.-C., Minh, K. D., & Cazenave, A. (2013). Terrestrial water dynamics in the lower Ganges — estimates from ENVISAT and GRACE. *Arabian Journal of Geosciences*, *6*(10), 3693—3702. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0629-z>.
- Mariani, P., Braitenberg, C. & Ussami, N. (2013). Explaining the thick crust in Paraná basin, Brazil, with satellite GOCE-gravity observations. *Journal of South American Earth Sciences*, *45*, 209—223. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.008>.
- Mayer-Gürr, T., Behzadpur, S., Ellmer, M., Kvas, A., Klinger, B., Strasser, S., & Zehentner, N. (2018). *ITSG-Grace2018: Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2018.003>.
- Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Sanso, F., Tscherning, C. C., Veicherts, M. (2010). *GOCE data analysis: the space-wise approach and the first space-wise gravity field model*. ESA Publications Division, Norwijk, The Netherlands, Bergen, Norway.
- Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Gatti, A., Sansò, F., & Herceg, M. (2011). *A GOCE-only global gravity field model by the space-wise approach*. Poster session presented at European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Austria.
- Moholdt, G., Wouters, B., & Gardner, A. S. (2012). Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic. *Geophysical Research Letters*, *39*(10), L10502. <https://doi.org/10.1029/2012GL051466>.
- Murbock, M., Gruber, Th., Baldesarra, M., Brieden, P., Daras, I., Danzmann, K., Doll, B., Feili, D., Flechtner, F., Flury, J., Heinzl, G., Iran-Pour, S., Kusche, J., Langemann, M., Löcher, A., Müller, J., Müller, V., Naeimi, M.,

- Pail, R., Raimondo, J.-C., Reiche, J., Reubelt, T., Sheard, B., Sneeuw, N., & Wang, X. (2014). Next Generation Satellite Gravimetry Mission Study. *5th International GOCE User Workshop. UNESCO. November 2014, Paris, France.*
- Pail, R., Goiginger, H., Mayrhofer, R., Schuh, W., Brockmann, J. M., Krasbutter, I., Hoeck, E., & Fecher, T. (2010a). GOCE gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method. *ESA Publications Division, Norwijk, The Netherlands, Bergen, Norway.*
- Pail, R., Goiginger, H., Schuh, W. D., Höck, E., Brockmann, J. M., Fecher, T., Gruber, T., Mayer-Gürr, T., Kusche, J., Jäggi, A., & Rieser, D. (2010b). Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20314, <https://doi.org/10.1029/2010gl044906>.
- Panet, I., Pollitz, F., Mikhailov, V., Diamant, M., Banerjee, P., & Grijalva, K. (2010). Upper mantle rheology from GRACE and GPS post seismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(6), Q06008. <https://doi.org/10.1029/2009GC002905>.
- Pearlman, M., Degnan, J., & Bosworth, J. (2002). The International Laser Ranging Service. *Advances in Space Research*, 30(2), 135—143. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00277-6).
- Rao, B. P., & Kumar, M. R. (2014). Seismic evidence for slab graveyards atop the core mantle boundary beneath the Indian Ocean Geoid Low. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 236, 52—59, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.08.005>.
- Reguzzoni, M., Sampietro, D., & Sansò, F. (2013). Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. *Geophysical Journal International*, 195(1), 222—237. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt247>.
- Reguzzoni, M., & Sampietro, D. (2015). GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 31—43. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.002>.
- Reigber, C., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R., Bode, A., Lemoine, J.-M., König, R., Loyer, S., Neumayer, H., Marty, J.-C., Barthelmes, F., Perosanz, F., & Zhu Yuan, S. (2002). A high-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S); *Geophysical Research Letters*, 29(14), 37-1—37-4. <https://doi.org/10.1029/2002gl015064>.
- Rudenko, S., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Förste, C., Lemoine, J.-M., Ablain, M., Alexandre, D., & Neumayer, K.-H. (2014). Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends. *Advances in Space Research*, 54(1), 92—118. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.010>.
- Saari, T., & Bilker-Koivula, M. (2015). Evaluation of GOCE-based Global Geoid Models in Finnish Territory. *Newton's Bulletin*, (5), 25—36.
- Sabadini, R., & Cambiotti, G. (2013). The 2011 Tohoku-Oki earthquake GCMT solution from the GOCE model of the Earth's crust. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(3), 335—346. <https://doi.org/10.4430/bgta0110>.
- Sampietro, D., Reguzzoni, M., & Negretti, M. (2013). The GEMMA crustal model: first validation and data distribution. *Proceedings of the ESA Living Planet symposium, Edinburgh, United Kingdom, 2014b (ESA SP-722, December 2013).*
- Sampietro, D., Reguzzoni, M., & Braitenberg, C. (2014). The GOCE estimated Moho beneath the Tibetan Plateau and Himalaya. In C. Rizos, P. Willis (Eds.), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet* (Vol. 139, pp. 391—397). International Association Geodesy Symposia. Springer.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 612 p.
- Steffen, H., Gitlein, O., Denker, H., Müller, J., & Timmen, L. (2009). Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry. *Tectonophysics*, 474, 69—77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
- Tapley, B. D., Chambers, D. P., Bettadpur, S., & Ries, J. C. (2003). Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid. *Geophysical Research Letters*, 30(22), 2163. <https://doi.org/10.1029/2003gl018622>.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reig-

- ber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09607. <https://doi.org/10.1029/2004gl019920>.
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 465 p.
- Velicogna, I., Sutterley, T. C., & van den Broeke, M. R. (2014). Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophysical Research Letters*, 41(22), 8130—8137. <https://doi.org/10.1002/2014GL061052>.
- Yong-zhi, Z., Hai-jun, X., Wei-Dong, W., Hu-rong, D. & Ben-ping, Z. (2011). Gravity anomaly from satellite gravity gradiometry data by GOCE in Japan Ms9.0 strong earthquake region. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 529—534. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.086>.

Гравітаційне поле Сарматії за супутниковими даними (модель EIGEN-6S2) і його інтерпретація

О. А. Чорна, Т. П. Єгорова, 2021

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Наведено стислий огляд супутникових спостережень місій CHAMP, GRACE і GOCE з вивчення глобального гравітаційного поля Землі та математичний апарат, використаний для цього, у вигляді розкладання геопотенціала по сферичних функціях. Розглянуто застосування супутникових даних у різних сферах наук про Землю. Як базову глобальну модель гравітаційного поля Землі за супутниковими даними розглянуто комбіновану модель EIGEN-6S2, що об'єднує дані супутникових місій GRACE і GOCE, а також використовує дані супутників лазерної локації LAGEOS. На її основі проаналізовано гравітаційне поле Сарматії з використанням аномалій у вільному повітрі, аномалій Буге, другої похідної геопотенціала і висот геоїда. Найчіткіше геологічні структури Сарматії та її оточення виявилися в аномаліях у вільному повітрі і розподілі другої похідної геопотенціала, що демонструють особливості гравітаційного поля Українського щита, Воронежського кристалічного масиву і Прип'ятсько-Дніпровсько-Донецької западини (ПДДЗ) з характерними аномаліями загального північно-західного простягання. Продовження структури ПДДЗ у південно-східному напрямку через вал Карпінського у північну частину Каспійського моря є свідченням існування протяжної древньої тектонічної зони Сармато-Туранського лінеамента. Геоїд у межах Сарматії відрізняється в цілому регіональною субширотною градієнтною зміною від +40 м на заході до -10 м на сході, що визначається положенням цієї структури між двома його глобальними аномаліями геоїда — максимумом Північної Атлантики і мінімумом Індійського океану.

Ключові слова: супутникова гравіметрія, модель гравітаційного поля Землі, модель EIGEN-6S2, геоїд, Сарматія.