УДК 551.14: 551.244

СТАБИЛЬНОСТЬ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

© 2024 г. Г. Э. Мельник^{1,2,3,} *, Г. М. Стеблов^{1,2,} **

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия ²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия ³Публично-правовая компания "Роскадастр", г. Москва, Россия

*E-mail: melnik@ifz.ru **E-mail: steblov@ifz.ru Поступила в редакцию 10.05.2023 г. После доработки 21.06.2023 г. Принята к публикации 12.07.2023 г.

По данным повторных спутниковых определений координат с помощью измерений на станциях ГНСС, расположенных на всей территории Российской Федерации, за период с 2015 г. и по настоящее время. провелен анализ геолинамики Северной Евразии. Для этой залачи использованы два источника исходных данных: наблюдения, полученные с пунктов $\Phi A \Gamma C$, и с пунктов Международной службы ГНСС (IGS) с постоянной регистрацией сигналов. Указанный набор данных позволил оценить корректность блоковой кинематики Евразийской плиты в трех моделях движения тектонических плит: NUVEL-1A, NNR-MORVEL-56 и ITRF2014. Анализ невязок наблюдаемых и модельных скоростей позволил выявить различную по величине систематическую составляющую для всех трех моделей в окрестности Восточно-Европейской платформы. Помимо анализа блоковой кинематики Евразийской плиты проведена оценка ее внутренней стабильности. Для этого были вычислены площадные деформации Северной Евразии методом конечных элементов. С этой целью к результатам обработки по двум исходным наборам данных были добавлены результаты обработки наблюдений из глобального массива Невадской геодезической лаборатории. В результате анализа поля деформаций помимо межплитовых пограничных деформаций, которые согласуются с существующими представлениям о геодинамике Северной Евразии, были выявлены внутриплитовые деформации, распределение которых согласуется с конфигурацией древних платформ Северной Евразии.

Ключевые слова: геодинамика, ГНСС, модели движения тектонических плит, поле деформаций земной поверхности, Северная Евразия.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0002333724020074, EDN: BLQUTJ

введение

Изучение кинематики платформенных областей является одним из актуальных вопросов современных движений земной коры (СДЗК), поскольку этим определяется взаимодействие между тектоническими плитами на их границах. Кроме того, СДЗК является ключевым фактором при построении современной высокоточной координатной основы. Среди многочисленных предшествующих исследований в большинстве случаев было недостаточно данных для подробной детализации современных движений и деформаций земной коры в платформенных областях. В настоящей работе мы использовали данные с пунктов Фундаментальной Астрономо-геодезической сети (ФАГС), на которых установлено постоянно действующее ГНСС оборудование. Этот набор данных характеризуется большим количеством пунктов и значительной продолжительностью наблюдений, по сравнению с предшествующими исследованиями по Северной Евразии. Это позволяет более точно определить ее кинематику и внутриплитовую стабильность.

Среди недавних исследований, посвященных вопросам оценки модельных значений скоростей пунктов земной поверхности, выделяется работа [Мельник и др., 2022], в которой, среди прочего, приводится анализ невязок наблюдаемых и модельных скоростей для нахождения оптимального пути вычета общеплитового движения. Однако в этой работе анализ строится на крайне малом количестве опорных пунктов, в отличие от нашего исследования. Значения невязок по порядку величин в нашем исследовании и в работе [Тимофеев и др., 2008] находятся на одном уровне.

В работе [Fernandes et al., 2003] авторы также сопоставляли модельные и реальные скорости, и на основании этого были получены оценки параметров вращения некоторых плит, которые и подлежали анализу. В нашей же работе мы анализировали именно невязки скоростей на земной поверхности, что позволило оценить систематические составляющие в различных частях одних и тех же тектонических плит. Внутриплитовые систематические составляющие хорошо видны на Евразийской тектонической плите, особенно в области Восточно-Европейской платформы.

Помимо фундаментальных вопросов геодинамики, детализированная и уточненная кинематика литосферных блоков в Северной Евразии важны для построения точной координатной основы, обеспечивающей надежную пространственную интерполяцию скоростей смещений земной поверхности по данным о подвижности опорных пунктов. Стабильность внутренних платформенных областей литосферных плит принималась за модельную основу для такой интерполяции, для которой было достаточно сравнительно небольшого представительного набора наблюдательных пунктов в пределах плиты. Кроме того, подобная концепция позволяла моделировать кинематику плит по комплексу сейсмологических данных, морфоструктурных и палеомагнитных (конфигурация поясов сейсмичности, механизмы очагов землетрясений, конфигурация срединно-океанических хребтов, ориентация трансформных разломов, полосовые магнитные аномалии вдоль срединно-океанических хребтов). Цель настоящего исследования состояла в оценке согласованности трех моделей движения тектонических плит, а именно NUVEL-1A [Argus, Gordon, 1991], NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2010], ITRF2014 [Altamimi et al., 2017] с наблюдениями ГНСС на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Кроме того, в данной работе проведена оценка внутриплитной стабильности северной части Евразийской тектонической плиты путем анализа площадных деформаций. Для этих целей привлекались данные не только

сети ФАГС, но и результаты обработки ГНСС наблюдений на экспедиционных пунктах Лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН, а также измерения международных пунктов ГНСС.

В рамках изучения стабильности платформенных областей северной части Евразии и анализа существующих оценок кинематики Евразийской плиты в целом выполнен анализ наблюдений ГНСС на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), развернутой за последние годы по всей территории РФ. Данная сеть существенно сгущает покрытие наблюдательными пунктами северной части Евразии по сравнению с установленными ранее пунктами международной сети ГНСС (IGS), что позволяет составить более детализированное представление о современных движениях земной коры на этой территории.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе в качестве исходных данных использовалась следующая информация:

– исходная измерительная информация (в виде фазовых спутниковых отсчетов) с постоянно действующего оборудования ГНСС на пунктах ФАГС (https://rgs-centre.ru/);

 исходная измерительная информация (в виде фазовых спутниковых отсчетов) периодических наблюдений ГНСС на пунктах северного полигона ИФЗ РАН;

 временные ряды декартовых геоцентрических координат международных геодезических пунктов в системе координат ITRF2014, вычисленные в архиве Невадской лаборатории;

– границы тектонических плит, а также их кинематические параметры по трем различным моделям: NUVEL-1A, NNR-MORVEL56 и ITRF2014.

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть представляет собой совокупность геодезических пунктов, расположенных на территории Российской Федерации с максимально возможной равномерностью. На рис. 1 приведена схема расположения пунктов ФАГС. Каждый пункт состоит из нескольких центров (пунктов). Одним из них является гравиметрический центр, на котором проводятся периодические (раз в 5–8 лет) абсолютные определения силы тяжести. Другим центром является, так называемый, рабочий центр на котором установлено постоянно действующее ГНСС оборудование. В результате чего формируется архив непрерывной многолетней измерительной информации.

На рис. 2 приведены два примера рабочих центров пунктов ФАГС в городах Ныроб (Пермский край) и Екатеринбург.

Наблюдательные пункты ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН

Второй источник данных — это исходная измерительная информация, полученная в результате многолетних наблюдений, периодически повторяемых Лабораторией спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. Повторные измерения представлены наборами по трем полигонам: Карельский, Кольский и Санкт-Петербургский. Периодические измерения на них выполняются, как правило, раз в 2 года в летний сезон [Гусева и др., 2020].

Пункты международной сети ГНСС (IGS)

Одной из задач геодезической лаборатории университета Невады в Рино (англ. Nevada Geodetic Laboratory University of Nevada, Reno, NGL) (geodesy.unr.edu) является аккумуляция и обработка данных наблюдений ГНСС с пунктов, расположенных по всему миру [Blewitt et al., 2018]. В результате этой работы сформирован архив временных рядов прямоугольных геоцентрических координат для приблизительно 20 000 геодезических пунктов, расположенных глобально.

В данной лаборатории для определения суточных координат пунктов используется метод точного абсолютного координатного определения – PPP (англ. *Precise Point Positioning*). Для реализации метода PPP в Невадской геодезической лаборатории используется следующее программное обеспечение: GipsyX Version 1.0, разработки Лаборатории реактивного движения NASA (англ. Jet Propulsion Laboratory's), а также ряд программных продуктов, разработанных в университете Невады в Рино: pppZap, pppTrop, wet2vapor, pppKenv, pppQA, pppCluster, ppp2Products, tenv3Plate, midas. Кроме того,



Карта пунктов ФАГС

Рис. 1. Схема расположения пунктов ФАГС (https://rgs-centre.ru/).

МЕЛЬНИК, СТЕБЛОВ



Рис. 2. Примеры рабочих центров пунктов ФАГС в городах Ныроб (слева) и Екатеринбург (справа).

используется программное обеспечение teqc Version 2018Oct15, разработанное некоммерческим консорциумом UNAVCO (unavco.org).

При формировании временных рядов в данной лаборатории была принята следующая уточняющая информация: прилив твердой оболочки Земли учтен по IERS Conventions (2010), поправка за движения полюса по IERS Conventions (2010). Приливная океаническая нагрузка учитывается следующим образом: дневной полусуточный прилив учтен по модели FES2004, полугодовой прилив учтен по модели IERS Conventions (2010). Тектонические движения, а также неприливные нагрузочные эффекты не учитываются.

Модели движения тектонических плит

В рамках концепции движения жестких сферических оболочек — литосферных плит — по поверхности земного шара горизонтальная скорость изменения координат V_i точки *i*, которая расположена на тектонической плите *k*, описывается векторным произведением:

$$\overline{V}_i = \overline{\Omega}_k \times \overline{R}_i, \qquad (1)$$

где: $\overline{V_i} = (\dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i)$ – линейные скорости изменения геоцентрических координат пункта земной поверхности, м/год; $\overline{\Omega}_k = (\omega_{k_x}, \omega_{k_y}, \omega_{k_z})$ – геоцентрический вектор вращения плиты k (вектор Эйлера), рад/год; $\overline{R}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ – геоцентрические координаты (радиус-вектор) точки i, м.

Вектор Эйлера $\overline{\Omega}_k$ имеет эквивалентное альтернативное представление в виде сферических координат полюса Эйлера φ_k , λ_k и угловой скорости вращения плиты относительно оси, проходящей через центр Земли и полюс Эйлера ω_k .

В рамках приведенной параметризации глобальные модели движения тектонических плит задаются:

 – количеством тектонических плит и конфигурацией их границ,

 – координатами полюса Эйлера (φ_P, λ_P) каждой плиты,

– угловой скоростью вращения

 каждой плиты вокруг полюса Эйлера.

Несмотря на простоту применения моделей движения литосферных плит, основанных на теореме Эйлера, для вычисления скоростей движения земной поверхности в любые точки земной поверхности, они предполагают ряд допущений:

 в качестве фигуры Земли предполагается сфера, а не более точная фигура в виде эллипсоида;

 модели вращения плит не учитывают вертикальные составляющие скоростей, поэтому, определяя скорости геодезических пунктов с помощью таких моделей, вертикальные составляющие движений принимаются нулевыми;

3) вопросы точного определения количества литосферных плит и конфигурации их границ: в разных моделях используется разное количество литосферных плит с несовпадающими границами.

В настоящее время существует множество различных кинематических моделей, параметризованных набором векторов Эйлера, среди них такие модели как: NUVEL-1, NUVEL-1A, HS2-NUVEL-1A, HS3-NUVEL-1A, APKIM2000, ITFR2000, REVEL2000, CGPS 2004, GSRM 1.2(2004), APKIM2005 – IGN, APKIM2005 – DGFI, ITRF2008, GEODVEL2010, MORVEL2010, NNR-MORVEL56, GSRM 2.1 (2014), ITRF2014.

Каждая из этих моделей имеет свои особенности и основывается на различных исходных данных: например, модель ITRF2014 основывается исключительно на геодезических данных; модель NUVEL-1, основывается на геологогеофизических данных; некоторые модели сочетают в себе комбинированную геодезическую и геолого-геофизическую основу.

В данной работе проанализированы три модели. Первая модель – NUVEL-1А – основывается на геофизических данных, состоит из 15 плит, создана в 1994 г. Вторая модель – NNR-MORVEL56 – основывается как на геофизических, так и на геодезических данных, состоит из 56 плит, создана в 2008 г. Третья модель – ITRF2014 – основывается исключительно на геодезических данных, состоит из 11 плит, создана в 2016 г.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Обработка наблюдений ГНСС

Для определения координат пунктов периодических повторных измерений ИФЗ РАН и пунктов ФАГС нами выполнялось сетевое относительное уравнивание, реализованное

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2024

в программном пакете GAMIT/GLOBK разработки Массачусетского технологического института (англ. MIT) [Herring et al., 2010]. Такой подход позволил достичь максимально возможной точности оценки смещений полевых наблюдательных пунктов ИФЗ РАН в условиях весьма ограниченных наборов измерений. Кроме того, благодаря данной методике были получены временные ряды пространственных геоцентрических координат пунктов ФАГС за весь доступный период. Временные ряды пунктов ФАГС носят непрерывный характер, т.к. на всех пунктах спутниковая геодезическая аппаратура работает в постоянном режиме. Данные для большинства пунктов ФАГС начинаются с 2015 г., однако есть пункты, которые появились позднее по мере развития сети.

На первом этапе обработки для каждого суточного сеанса решались уравнения наблюдений фазовых спутниковых отсчетов относительно векторов взаимных положений определяемых и опорных пунктов международной службы ГНСС, первичные оценки координат полевых определяемых пунктов совместно с опорными пунктами международной службы ГНСС (англ. International GNSS Service – IGS), а также ковариационные матрицы всех оцениваемых параметров (на данном этапе использовался модуль GAMIT из пакета GAMIT/GLOBK). Для определения координат применялись прецизионные параметры орбит спутников, предоставляемые службой IGS. Используя ковариационные связи, вычисленные на первом этапе, первичное решение было оптимизировано путем Калмановской фильтрации с использованием ковариационных матриц, вычисляемых для координат пунктов всей мировой сети, формируемых в Центре постоянных сетей и орбит им. Скриппса (англ. Scripps Orbit and Permanent Array Center – SOPAC) (sopac.ucsd.edu) (на данном этапе использовался модуль GLOBK из пакета GAMIT/GLOBK). На завершающем этапе формировались временные ряды координат всех обрабатываемых геодезических пунктов.

Скорости геодезических пунктов определялись из линейной регрессии временных рядов, которая выполнялась с помощью взвешенного метода наименьших квадратов. В результате, для всего набора пунктов (36 пунктов ФАГС, 4 пункта IGS, находящиеся на территории РФ) были получены линейные скорости изменения их координат и ковариационные матрицы скоростей.

На рис. 3 представлен пример временного ряда топоцентрических координат, вычисленных путем



Рис. 3. Временной ряд и линейный тренд координат пункта ФАГС, расположенного в городе Котлас Архангельской области.



Рис. 4. Карта горизонтальных скоростей пунктов ФАГС по данным ГНСС в общеземной геоцентрической системе координат ITRF2014.

трансформации из геоцентрического и линейного тренда для одного из пунктов ФАГС.

На рис. 4 представлены горизонтальные скорости движения пунктов ФАГС и IGS, в системе координат ITRF2014.

Невязки скоростей

Сравнение вычисленных скоростей пунктов ФАГС с модельными было выполнено для трех из перечисленных выше моделей: NUVEL-1A, NNR-MORVEL56 и ITRF2014. Результаты данного сравнения приведены на нижеследующих рисунках.

На рис. 5 приведена карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, вычисленными с помощью (1) по векторам Эйлера в NNR-MORVEL56.

На рис. 6 приведена карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, вычисленными с помощью (1) по векторам Эйлера в NUVEL-1A.

На рис. 7 приведена карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, вычисленными с помощью (1) по векторам Эйлера в ITRF2014.

Показанные на рис. 5-рис. 7 невязки анализируются далее в разделе Обсуждение результатов.

ЛАТЕРАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Моделирование кинематики литосферных плит как вращение недеформируемых блоков литосферы основано на допущении об их внутренней стабильности и локализации межплитовых деформаций вдоль границ. Обоснованность таких допущений вытекала из интенсивности внутриплитных деформаций, величина которых на 2–3 порядка ниже межплитовых пограничных деформаций и ниже точности измерений, достижимой ранее с помощью спутниковой геодезии, по крайней мере, для Северной Евразии. Однако значительное сгущение наблюдательной сети за последние годы по Северной Евразии и существенно возросшая продолжительность имеющихся наблюдений обусловили возможность дать количественную оценку, в том числе, и внутриплитной стабильности для этой территории.

Для задачи оценки внутриплитовых деформаций мы распространили регион исследования на более обширную часть северной Евразии и использовали расширенный набор исходных данных, а именно: скорости движений пунктов ФАГС, скорости движения периодически наблюдаемых полевых пунктов ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН и скорости движения международных пунктов, временные ряды координат которых представлены в архиве Невадской лаборатории.

На рис. 8 показаны вектора скоростей геодезических пунктов, использовавшихся для оценки площадных деформаций исследуемого региона.

Для расчета деформаций нами использовалось покрытие исследуемой территории конечным набором треугольных элементов. Для



Рис. 5. Карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, определенными по NNR-MORVEL56.



Рис. 6. Карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, определенными по NUVEL-1А.



Рис. 7. Карта невязок скоростей пунктов ФАГС с модельными скоростями, определенными по ITRF2014.



Рис. 8. Карта скоростей геодезических пунктов, использовавшихся для оценки площадных деформаций. Синим цветом показаны международные пункты, красным – пункты ФАГС и зеленым – периодически наблюдаемые экспедиционные пункты ИФЗ РАН.

этого из набора исходных пунктов формировались треугольники с помощью алгоритма Делоне [Delaunay et al., 1934], реализованного в программном наборе инструментов Generic Mapping Tools [Wessel et al., 2019], в результате чего исследуемая территория была покрыта сетью оптимальной триангуляции, представленной на рис. 9.

Уравнение движения каждой точки треугольника имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{EE} & \varepsilon_{EN} - \Omega \\ \varepsilon_{EN} + \Omega & \varepsilon_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ N_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_E \\ t_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где: V_E, V_N — восточная и северная горизонтальные компоненты скорости пункта, соответственно; Ω — угловая скорость вращения треугольника; E_0, N_0 — топоцентрические координаты пункта, относительно центра треугольника; t_E, t_N — восточная и северная компоненты поступательной скорости треугольника; $\varepsilon_{EE}, \varepsilon_{EN}, \varepsilon_{NN}$ — элементы тензора скорости деформации.

Таким образом, кинематика каждого треугольника определяется системой из шести уравнений с шестью неизвестными:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -N_{1}E_{1} & N_{1} & 0 \\ 0 & 1 & E_{1}0 & E_{1} & N_{1} \\ 1 & 0 & -N_{2}E_{2} & N_{2} & 0 \\ 0 & 1 & E_{2}0 & E2 & N_{2} \\ 1 & 0 & -N_{3}E_{3} & N_{3} & 0 \\ 0 & 1 & E_{3}0 & E_{3} & N_{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{E} \\ t_{N} \\ \Omega \\ \varepsilon_{EE} \\ \varepsilon_{EN} \\ \varepsilon_{NN} \\ v_{N_{3}} \end{bmatrix}$$
(3)

или в матричном виде:

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d}, \tag{4}$$

[**1**7]

где **d** — вектор известных компонент скорости для трех вершин треугольника в левой части; **m** — вектор искомых величин в правой части; **G** — связывающий их линейный оператор, определяемый геометрией треугольника.

Решение системы (3) имеет вид:

$$\mathbf{m} = G^{-1}\mathbf{d} \tag{5}$$

с ковариационной матрицей соv **m**, определяющей погрешность искомых величин, в виде:

$$\operatorname{cov} \mathbf{m} = \left[\boldsymbol{G}^T \left(\operatorname{cov} \mathbf{d} \right)^{-1} \boldsymbol{G} \right]^{-1},$$



Рис. 9. Триангуляция, построенная по исходным наблюдательным пунктам. Красными точками обозначены центры треугольников, участвовавших в вычислении деформаций.

где соv **d** — ковариационная матрица ошибок известных величин, полученных в ходе линейной регрессии временных рядов координат на завершающем этапе обработки исходных измерений (см. выше).

В результате решения (4) интенсивность площадных деформаций представляется следующим образом:

$$\delta = \varepsilon_{EE} + \varepsilon_{NN} \tag{6}$$

Сформированная оценка площадных деформаций (6), отнесенная к центрам треугольников и интерполированная на непрерывную сетку, показана на рис. 10. Максимальное значение средней квадратической ошибки скорости дилатации составило $6.7 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка точности моделей движения плит

В данной работе мы представляем анализ точности горизонтальных скоростей земной поверхности, получаемых с помощью моделей движения тектонических плит, на примере трех моделей, а именно NNR-MORVEL56 (рис. 5), NUVEL-1A (рис. 6) и ITRF2014 (рис. 7). Анализ выполняется путем сравнение модельных скоростей с реально наблюдаемыми, определенными из обработки временных рядов координат пунктов ФАГС.

Из анализа следует, что невязки скоростей по моделям NNR-MORVEL56 и NUVEL-1A, во-первых, нельзя считать пренебрежимо малыми и для модели NNR-MORVEL56 находятся на уровне 2-3 мм/год, а для модели NUVEL-1A находятся на уровне 3-5 мм/год. Во-вторых, направление невязок скоростей для этих моделей носит систематический характер, особенно явно преобладающее северо-восточное направление наблюдается на европейской части РФ.

В дальневосточной части РФ многие пункты расположены вблизи границ тектонических плит, где происходят активные межплитовые деформационные процессы, поэтому в этих регионах модели блокового движения тектонических плит не применимы, что проявляется в разнонаправленном характере невязок скоростей и заметном увеличении векторов, в особенности для пунктов Южно-Сахалинск и Петропавловск-Камчатский.

Отличные от нуля, систематически направленные невязки скоростей приводят к выводам о погрешностях определения параметров движения (угловая скорость вращения и координаты полюса Эйлера) для Евразийской плиты в моделях NNR-MORVEL56 и NUVEL-1A.



Рис. 10. Скорость площадных деформаций. Оттенками желтого показаны зоны растяжения, оттенками синего – зоны сжатия.

В отношении модели ITRF2014, можно отметить, что невязки скоростей намного меньше по величине, чем в приведенных выше моделях. В направлении невязок скоростей не просматривается систематическая составляющая, что говорит о более точном определении параметров блокового движения Евразийской плиты в данной модели. При этом модель ITRF2014 покрывает не всю поверхность Земли, и имеет "белые пятна", которые приходятся на регионы активных геодинамических процессов, где моделирование скоростей движения земной поверхности требует более сложных подходов по сравнению с внутриплитными зонами. В связи с этим дальневосточная часть РФ, а именно, Амурская и Охотская плиты, в данной модели не представлены.

Оценка площадных деформаций

Для исследования вопроса применимости блоковых кинематических моделей на сфере для Евразийской плиты в данной работе была построена карта интенсивности плоских латеральных деформаций, представленная на рис. 10. Из этой карты видно, что Евразийская плита испытывает вариативные деформации как растяжения, так и сжатия, которые на большей части внутренних платформенных областей имеют порядок $\pm 10^{-9}$ год⁻¹, сопоставимый с достигнутой в прежние годы точностью измерений.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2024

Зона значительного сжатия наблюдается на восточных окраинах РФ, что объясняется процессами субдукции Тихоокеанской плиты. В районе озера Байкал отмечается область растяжения, связанная с Байкальским рифтогенезом. В центральной части Фенноскандии выделяется регион растяжения, ассоциируемый с постледниковым поднятием. Кроме того, на восточных окраинах Фенноскандии наблюдается полоса сжатия, маркирующая переход от куполообразного поднятия к платформенным областям. Более подробные материалы о Фенноскандии в целом, и о выявленной зоне сжатий в частности представлены в работе [Мельник и др., 2022].

Отдельный вопрос о внутриплитной стабильности вызывает Уральский хребет. По результатам, представленным на карте интенсивности горизонтальных деформаций, при пересечении этого хребта с запада на восток наблюдается переход от растяжения к сжатию, что, возможно, говорит взаимном движении платформенных областей, разделенных хребтом. Однако, по существующим представлениям, считается, что Уральские горы с высокой степенью стабильны и не подвержены активным геодинамическим процессам и деформациям, поэтому данный результат представленных построений требует дальнейшего изучения. Кроме того, переход от Западносибирской к Сибирской платформе также маркируется локальной вариацией деформаций.

Таким образом, в результате анализа поля деформаций по Северной Евразии помимо межплитовых пограничных деформаций, которые согласуются с существующими представлениям о ее геодинамике были выявлены внутриплитовые деформации, распределение которых согласуется с конфигурацией древних платформ, составляющих данную плиту.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Федерального проекта "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС" Государственной программы Российской Федерации "Космическая деятельность России" на 2021–2030 гг. № 1210806000081-5 (номер ЕГИСУ), а также в рамках тем НИР Государственных заданий ИТПЗ РАН и ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П., Розенберг Н.К. Спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 24–32. doi.org/10.21455/gr2020.1-2

Мельник Г.Э., Стеблов Г.М., Галаганов О.Н., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Розенберг Н.К., Передерин Ф.В., Передерин В.П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2022. № 2. С. 26–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В. Тектонические и постсейсмические движения Алтае-Саянского региона по GPS данным // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2008. Т. 3. № 2. С. 274–278.

Altamimi Z. et al. ITRF2014 plate motion model //Geophysical Journal International. 2017. V. 209. № 3. P. 1906–1912.

Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // Geophysical research letters. 1991. V. 18. \mathbb{N} 11. P. 2039-2042.

Argus D. et al. NNR-MORVEL56: No-net-rotation model of geologically current plate motions// AGU Fall Meeting Abstracts. 2010. V. 2010. P. G43A-0819.

Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos. 2018. V. 99. DOI: https://doi.org/10.1029/2018EO104623

Delaunay B. et al. Sur la sphere vide //Izv. Akad. Nauk SSSR. Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk. 1934. V. 7. № 793–800. P. 1–2.

Fernandes R.M.S. et al. The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 16.

Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts: Cambridge. 2010.

Wessel P., et al. The generic mapping tools, version 6. Geochemistry, Geo-physics, Geosystems. 2019. P. 5556–5564.

Stability of Northern Eurasia Based on Satellite Geodesy Data

G. E. Melnik^{*a,b,c,*} * and G. M. Steblov^{*a,b,*} **

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia ^bInstitute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia ^cPublic Law Company "Roskadastr," Moscow, 107078 Russia *e-mail: melnik@ifz.ru

***e-mail: steblov@ifz.ru* Received May 10, 2023 revised June 21, 2023 accepted July 12, 2023

Abstract – The geodynamics of Northern Eurasia has been analyzed based on repeated satellite positioning with GNSS stations throughout the Russian Federation territory from 2015 to the present. The study utilized two sources of data: observations from the stations of the Russian Fundamental Astro-Geodetic Network (FAGN) and stations of the International GNSS Service (IGS) with permanent satellite tracking. This data set allowed to estimate correctness of the block kinematics of the Eurasian plate in three tectonic plate motion models: NUVEL-1A, NNR-MORVEL-56, and ITRF2014. The analysis of the misfits between the observed and model velocities has shown that these misfits have a systematic component in the vicinity of the East European Platform which differs for each of three models. In addition to analyzing the block kinematics

of the Eurasian plate, we also evaluated its internal stability. To do this, we calculated the areal deformations of Northern Eurasia using the finite element method. For this purpose, we added the observations processing results from the global data set of the Nevada Geodetic Laboratory to the processing results from two original data sets. Besides interplate boundary deformations which are consistent with existing ideas of the geodynamics of Northern Eurasia, the strain field analysis also revealed intraplate deformations distributed consistently with the configuration of the Northern Eurasia cratons.

Keywords: geodynamics, GNSS, tectonic plate motion models, surface deformation field, Northern Eurasia