

О точности определения скоростей движения геодезических пунктов

© Г. Э. Мельник¹, И. А. Ощепков²

¹ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Реферат

Целью настоящего исследования является изучение точности определения скоростей перемещения геодезических пунктов на земной поверхности с учетом тектонических процессов. Этот аспект особенно важен, поскольку постоянные смещения, вызванные тектонической активностью, могут быть определены либо с помощью повторных геодезических наблюдений, либо через моделирование движения тектонических плит. Отмечается, что каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, но основное внимание уделяется оценке точности определения скоростей, поскольку параметры движения пунктов являются важным элементом в современных системах координат.

Методологическую основу исследования составляют данные, полученные с постояннодействующих пунктов ГНСС. Эти данные предоставляют обширную картину движения геодезических пунктов и являются незаменимыми при изучении тектонической активности. Исследование включает в себя анализ и сравнение скоростей, полученных из временных рядов геоцентрических координат, со скоростями, полученными из моделей движения тектонических плит.

В результате данного исследования выявлено, что, хотя в целом модели движения тектонических плит дают сходные результаты, каждая из них обладает своими особенностями. Было замечено, что наибольшие погрешности связаны с зонами соприкосновения плит, где происходят значительные деформации земной поверхности. Эти выводы существенно влияют на понимание процессов, происходящих в земной коре, и на подходы к созданию и усовершенствованию систем координат.

Ключевые слова: геодезия, геодинамика, литосферные плиты, ГНСС, системы координат, модели движения плит.

Контакты для связи: Мельник Геннадий Эдуардович (gena.melinik2@mail.ru).

Для цитирования: Мельник Г. Э., Ощепков И. А. О точности определения скоростей движения геодезических пунктов // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 69. С. 26–38.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.26-38>

On the Accuracy of Determining the Velocities of Geodetic Points

G. E. Melnik¹, I. A. Oshchepkov²

¹PLC Roskadastr, Moscow, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The aim of this study is to investigate the accuracy of determining the velocities of geodetic points on the Earth's surface with tectonic processes being taken into account. This aspect is of particular importance as the constant displacements caused by tectonic activity can be determined either through repeated geodetic observations or through modeling tectonic plate motion. It is noted that each of these approaches has its advantages and disadvantages, but the main focus is on assessing the accuracy of velocity determination, as the motion parameters of points are crucial elements in modern coordinate systems.

The research methodology is based on data obtained from continuously operating GNSS stations. These data provide a comprehensive picture of the motion of geodetic points and are essential for studying tectonic activity. The study includes the analysis and the comparison of velocities derived from time series of geocentric coordinates with velocities obtained from models of tectonic plate motion.

As a result of this study, it has been found that although overall tectonic plate motion models yield similar results, each model has its own peculiar features. It has been observed that the largest errors are associated with plate boundary zones where significant deformations of the Earth's surface occur. These findings significantly contribute to understanding the processes occurring in the Earth's crust and the approaches for establishing and improving coordinate systems.

Keywords: geodesy, geodynamics, lithospheric plates, GNSS, coordinate systems, plate motion models.

Contacts: Gennady E. Melnik (gena.melinik2@mail.ru).

For citation: Melnik G. E., Oshchepkov I. A. On the accuracy of determining the velocities of geodetic points // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 69. P. 26–38.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.26-38>

Введение

Геодинамика как научная дисциплина появилась в двадцатые годы прошлого века и сформировалась в восьмидесятые годы того же столетия. С тех пор было доказано, что поверхность Земли разделена на некоторое количество разных частей, названных тектоническими плитами. Каждую тектоническую плиту в первом приближении можно рассматривать как твёрдое недеформируемое тело, которое движется по поверхности Земли со скоростью 2–10 см/год.

Для того чтобы каким-либо образом сопоставлять и сравнивать измеренные на поверхности Земли величины, например, координаты геодезических пунктов, принято приводить их к единой эпохе. Данный подход используется в современных системах координат. Например, в ITRF2014 опорной является эпоха 2010.0 ([Altamimi, 2016](#)), а в государственной системе координат ГСК-2011 — эпоха 2011.0 ([Ефимов, 2017](#)).

Целью данного исследования является анализ применяемых методов и точности учёта скоростей изменения координат пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) во времени для повышения стабильности государственной системы координат.

Земная кора постоянно подвергается различным воздействиям, основной из которых — тектоническая активность, проявляющаяся в форме сдвигов и деформаций. Это приводит к постоянным изменениям в положении геодезических пунктов. Такие смещения могут быть определены либо непосредственно из повторных геодезических наблюдений, либо по моделям движения тектонических плит.

Особое внимание в этом исследовании уделяется оценке точности определения скоростей движения геодезических пунктов. Поскольку геодезические пункты являются составными элементами современных систем координат, точность их определения имеет критическое значение для целого ряда областей, включая геодезию, картографию, а также для более широкого применения в навигационных системах и системах мониторинга окружающей среды.

Существуют два основных подхода к определению смещений геодезических пунктов. Первый подход включает в себя проведение повторных геодезических наблюдений, которые могут быть осуществлены с помощью различных техник, таких как GPS-мониторинг, наземное лазерное сканирование или радиоинтерферометрия. Второй подход основывается на использовании моделей движения тектонических плит, которые позволяют оценить движение коры в контексте широких геологических процессов.

Оба подхода имеют свои достоинства и недостатки. Повторные геодезические наблюдения могут обеспечить высокую точность на коротких временных интервалах, являясь весьма трудоёмкими и дорогостоящими. С другой стороны, модели движения тектонических плит могут предоставить общую картину движения коры, но при этом быть менее точными на мелкомасштабном уровне или в областях с высокой тектонической активностью.

На рис. 1 представлен график временного ряда пункта J046, находящегося в Японии. Данный график наглядно иллюстрирует тот факт, что пункты на земной поверхности находятся в постоянном движении и модель (траектория) их перемещения может быть достаточно сложной, не обязательно линейной: она может включать в себя и периодические составляющие, и резкие скачки, и экспоненциальные компоненты, и логарифмические.

Тем не менее на большинстве территорий земной поверхности превалирует линейный характер движения земной поверхности. Именно поэтому в данной работе мы анализировали линейные скорости движения земной поверхности.

В настоящее время существует множество различных моделей, основанных на теореме Эйлера ([Бухгольц, 1965](#)). Каждая из моделей имеет свои особенности и основывается на различных исходных данных. Некоторые, как, например, модель ITRF2014 ([Altamimi et al., 2016](#)), основаны только на геодезических данных. Другие, например, модель NUVEL-1, построены с опорой на геофизические данные.

В данном исследовании авторами проведена оценка точности четырёх моделей движения тектонических плит, а именно: NUVEL-1A ([DeMets et al., 1994](#)), NNR-MORVEL56 ([Argus et al., 2011](#)), ITRF2014 ([Altamimi et al., 2016](#)) и GSRM 2.1 (2014) ([Kreemer et al., 2014](#)). Оценка выполнена путём сравнения скоростей движения геодезических пунктов, вычисленных по непрерывным наблюдениям, и скоростей, полученных с помощью перечисленных моделей.

При выборе данных моделей авторы руководствовались следующими умозаключениями. Модель NUVEL-1A является одной из наиболее известных и, возможно, классической моделью, с помощью которой чаще всего вычисляют скорость движения геодезических пунктов. Она была опубликована почти 30 лет назад и является уточнением модели NUVEL-1, кроме того, она базируется в основном на геофизических данных. Модель ITRF2014, напротив, является одной из недавно опубликованных моделей, и она основана только лишь на геодезических данных. Что касается модели NNR-MORVEL56, то при её построении использовались как геофизические, так и геодезические

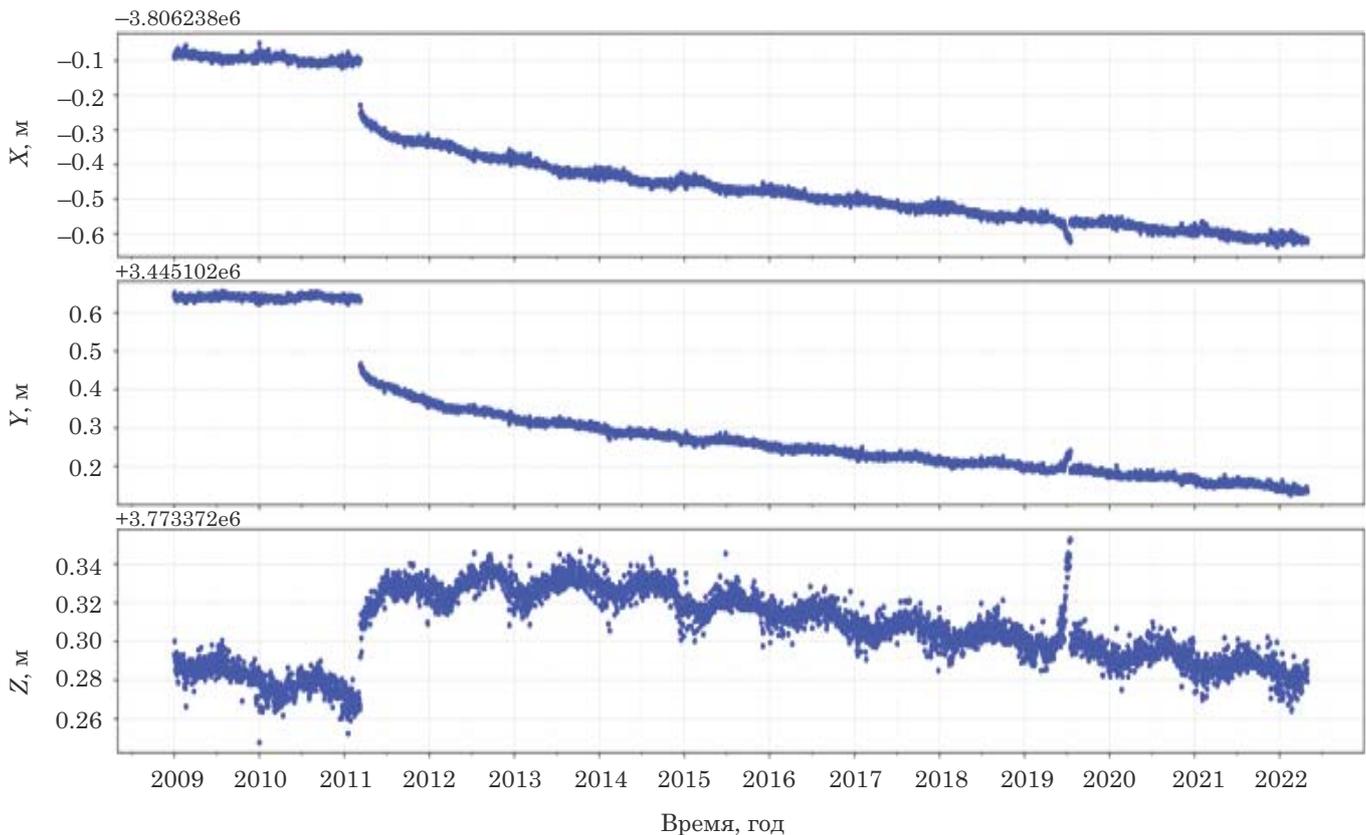


Рис. 1. График временного ряда пункта J046, находящегося в Японии

исходные данные. И данная модель включает в себя заметно большее число литосферных плит, чем модели упомянутые ранее — 56 плит у NNR-MORVEL56 по сравнению с 15 плитами у NUVEL-1A и 11 у ITRF2014. Модель GSRM 2.1 (2014) основана исключительно на геодезических данных и имеет непростую конфигурацию подвижных блоков, включая обширные деформационные зоны, вследствие чего литосферные плиты в данной модели покрывают менее 100 % площади Земли, однако в тех регионах, где плиты всё же представлены, точность скоростей оказывается на высоком уровне.

Исходные данные

В качестве исходных данных в настоящей работе мы использовали результаты обработки первичных данных, выполняемой в Невадской геодезической лаборатории университета Невады в Рино (англ. Nevada Geodetic Laboratory University of Nevada, Reno. NGL) (Blewitt et al., 2018). В данной лаборатории для определения суточных координат пунктов был использован метод точного абсолютного координатного определения — PPP (англ. Precise Point Positioning). Для реализации метода PPP в Невадской геодезической лаборатории используется программное обеспечение GipsyX (Bertiger et al., 2020), а также теqc (Estey, Meertens, 1999) и ряд программных продуктов, разра-

ботанных в университете Невады в Рино (Blewitt et al., 2018)

При формировании временных рядов в данной лаборатории были приняты следующие поправки: прилив твёрдой оболочки Земли учтён по IERS Conventions (2010) (Luzum, Petit, 2012), поправка за движения полюса — по IERS Conventions (2010). Приливная океаническая нагрузка учитывается следующим образом: дневной полусуточный прилив учтён по модели FES2004 (Lyard et al., 2006), полугодовой прилив — по IERS Conventions (2010). Тектонические движения, а также неприливные нагрузочные эффекты не учитываются.

Для достижения максимальной точности в исследовании скоростей геодезических пунктов критически важно обеспечить высокое качество исходных данных. Исследование, основанное на недостаточно качественных или неполных данных, может привести к ошибкам в результате и искажению выводов. В связи с этим, прежде чем приступать к сравнению скоростей геодезических пунктов, полученных по моделям движения тектонических плит и по непрерывным измерениям, была проведена предварительная фильтрация исходных данных.

При проведении фильтрации данных были учтены следующие критерии: продолжительность, количество пропусков и точность определения

скорости. Фильтрация массива исходных данных проводилась по следующим критериям:

1. Продолжительность временного ряда должна быть не менее трёх лет. Данный критерий направлен на то, чтобы отсеять короткие временные ряды, так как для надёжного вычисления скорости требуется соответствующий период наблюдений.

2. Количество пропусков в ряду не должно превышать 80 %. Данный критерий направлен на повышение надёжности определения скорости.

3. Неопределённость скорости пункта не должна превышать трёх медианных неопределённостей. Медианная неопределённость вычисляется из набора пунктов, прошедших первые два критерия. Данный критерий направлен на отбраковку временных рядов с грубыми погрешностями,

большим количеством шумов и самое главное — резкими скачками во временном ряду. Данный критерий выполнялся дважды в целях повышения надёжности.

На момент вычислений в архиве Невадской геодезической лаборатории находилось 19650 пунктов. В табл. 1 приведен список и порядок критериев фильтрации, применявшихся к данному архиву, а также количество пунктов, прошедших критерий.

После проверки всех временных рядов на эти критерии было отбраковано более десяти тысяч из них. На рис. 2 показаны пункты прошедшие все критерии и участвовавшие в оценке точности как моделей движения тектонических плит, так и линейной регрессии.

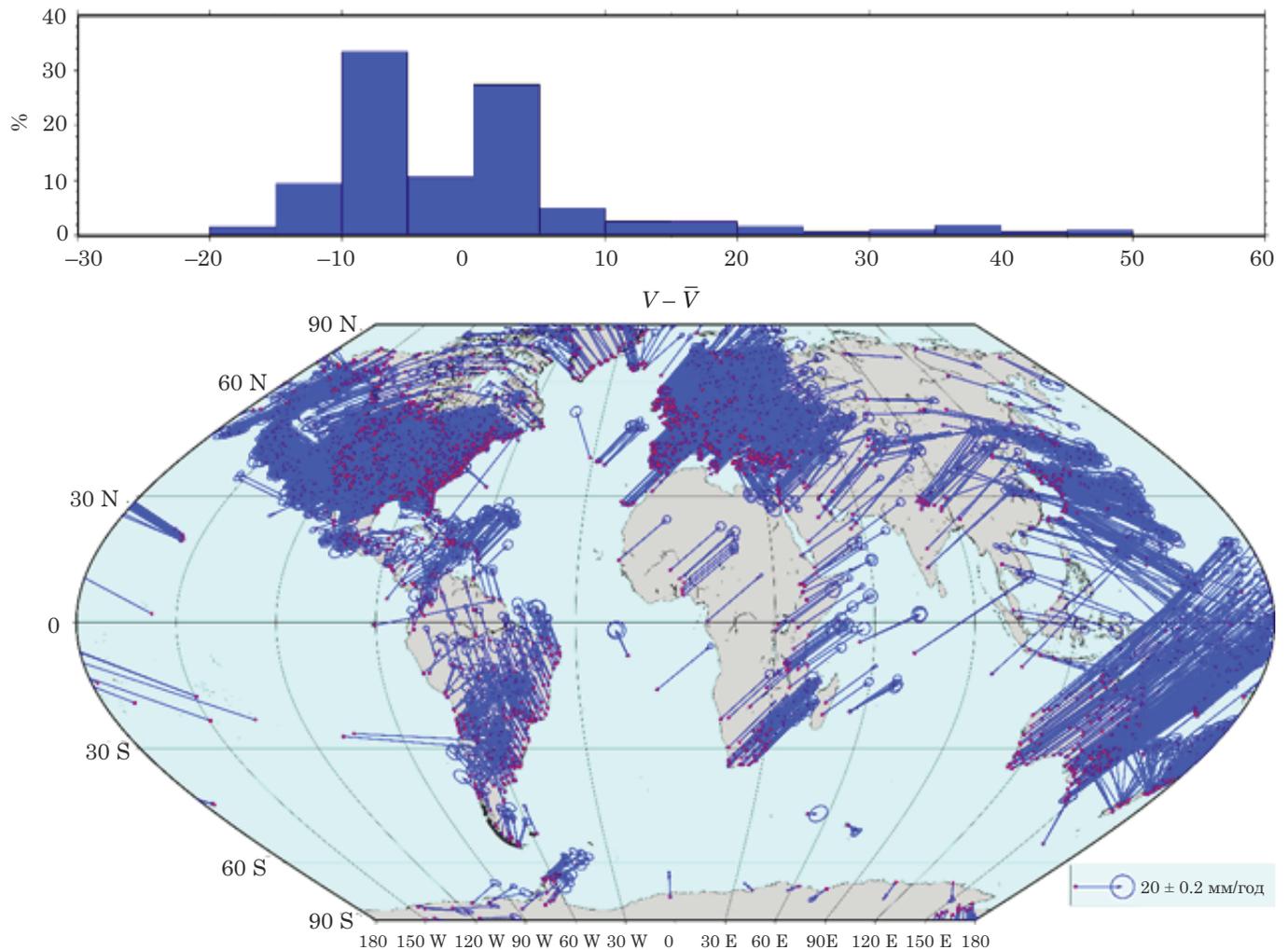


Рис. 2. Скорости движения геодезических пунктов, прошедших все критерии и участвовавшие в оценке точности с эллипсами ошибок m_v ; на гистограмме показано отличие скоростей от средней по всем пунктам, мм/год

Таблица 1

Критерии фильтрации, применявшиеся к архиву исходных данных

№	Критерий	Цель критерия	Количество пунктов, прошедших критерий
1	> 3 лет наблюдений	Возможность вычислить скорость	16 069
2	< 50 % пропусков	Повышение надёжности	14 209
3	$\sigma_{v_i} < 3 \cdot \sigma_{v_{median}}$	Исключение резких скачков и грубых вылетов	10 375
4	$\sigma_{v_i} < 3 \cdot \sigma_{v_{median}}$	Повышение надёжности	8 904

Таблица 2

Статистические параметры скоростей пунктов, прошедших фильтрацию

мм/год	min	max	mean	std	m_{min}	m_{max}	m_{mean}	m_{std}
V_E	-72.1	66.2	-1.3	19.5	0.00	0.03	0.01	0.01
V_N	-80.7	73.8	7.8	15.4	0.00	0.04	0.01	0.01
V_h	0.1	88.9	23.2	12.0	0.01	0.11	0.04	0.02
A_V°	0.0	359.9	177.5	110.1	0.00	14.15	0.12	0.19

Для всех пунктов, прошедших фильтрацию, была вычислена горизонтальная скорость по формуле

$$V_h = \sqrt{V_E^2 + V_N^2},$$

и её оценка точности — по формуле

$$m_{V_h} = \sqrt{(V_E^2 + V_N^2)^{-1} \cdot (V_E^2 \cdot m_{V_E}^2 + V_N^2 \cdot m_{V_N}^2)},$$

где V_E и V_N — восточная и северная компоненты скорости пункта соответственно; m_{V_h} — погрешность горизонтальной скорости; m_{V_E} и m_{V_N} — погрешности восточной и северной компоненты скорости соответственно. Азимут горизонтальной скорости вычислялся по следующей формуле:

$$A = \arctan \frac{V_E}{V_N}.$$

Статистические параметры вычисленных скоростей приведены в табл. 2.

В таблице столбцы min, max, mean, std означают минимальное значение, максимальное значение, среднее значение и стандартное отклонение (уровень разброса относительно среднего) соответственно; в столбцах m_i приведены погрешности соответствующих величин.

Стоит отметить, что оценки погрешностей по временным рядам, полученные с помощью классического метода наименьших квадратов (МНК), оказываются чрезмерно завышенными ввиду большого количества наблюдений (N дат > 1000) и неучёта так называемых «цветных шумов» (Williams, 2003; Herring, 2003; Малкин, 2011). Однако, так как в данной работе сравнению подвергались не погрешности, вычисленные по МНК, а значения скоростей, неучёт цветных шумов не внес искажений в полученные результаты.

Методы определения скоростей геодезических пунктов

Как было сказано ранее, существует несколько способов нахождения скоростей движения геодезических пунктов, наиболее точным из которых является оценка изменения координат точки на земной поверхности как функции, линейно зависящей от времени. Простейшее представление такой функции выглядит следующим образом:

$$\bar{X}(t_0) = \bar{X}(t) - v \cdot (t - t_0),$$

где $\bar{X}(t)$ — координаты пункта, измеренные в момент t ; $\bar{X}(t_0)$ — координаты пункта, измеренные в момент t , но отнесённые к эпохе t_0 ; v — линейная скорость пункта.

Очевидно, что для нахождения скорости достаточно двух измерений. Однако при наличии избыточных измерений следует применить МНК, и таким образом получить оценку линейной регрессии.

В общем виде процесс уравнивания временно-го ряда представляется следующим образом:

1. Составление уравнения, относительно которого применяется МНК. В данном случае это уравнение прямой:

$$y = y_0 + v(t - t_0).$$

2. Применение МНК, который можно описать следующей формулой:

$$V = -(A^T P A)^{-1} A^T P L,$$

где A — матрица коэффициентов нормальных уравнений поправок, P — весовая матрица, L — вектор свободных членов, V — вектор поправок.

3. Оценка точности линейной скорости из МНК:

$$m_v = \sqrt{\frac{(AV + L)^T P (AV + L)}{n - k}},$$

где n — количество «измерений» (в случае временного ряда координат, количество дней), k — количество определяемых величин (в случае линейного уравнения равно 2).

Другим способом, пусть и менее точным, но зато более универсальным, позволяющим вычислить скорость движения геодезического пункта в любой точке Земли, является модель движения литосферных плит, основанная на теореме вращения Эйлера. В подобных моделях вся поверхность Земли разделена на блоки, считающиеся абсолютно твёрдыми и недеформируемыми. Для каждого такого блока известны: границы; угловая скорость вращения вокруг оси, проходящей через центр Земли, и точки, расположенной на её поверхности; координаты этой точки, называемой полюсом Эйлера.

Зная вышеперечисленные параметры, возможно вычислить составляющие горизонтальной линейной скорости по следующим формулам:

$$v_E = R\omega \cos \varphi [\sin \varphi_P - \cos \varphi_P \tan \varphi \cos (\lambda_P - \lambda)],$$

$$v_N = R\omega \cos \varphi_P \cos (\lambda - \lambda_P),$$

где v_E, v_N — восточная и северная составляющие вектора скорости геодезического пункта; φ, λ — сферические координаты пункта; φ_P, λ_P — сферические координаты полюса Эйлера; ω — угловая скорость вращения плиты; $R = 6.371 \cdot 10^6$ м — средний радиус Земли.

Одним из самых значимых преимуществ подобного рода моделей является тот факт, что они позволяют вычислить скорость движения земной поверхности в любой точке Земли. Кроме того, стоит отметить относительную простоту вычислений.

К недостаткам данных моделей можно отнести следующие особенности:

1. Движение происходит по сфере, а не по эллипсоиду.
2. Невозможно определить вертикальные смещения.
3. Неточность в числе и границах плит, параметрах их вращения.
4. На самом деле плиты не являются твёрдыми, особенно вблизи границ.

Оценка точности моделей движения литосферных плит

Оценка точности моделей движения тектонических плит выполнялась путём сравнения скоростей, вычисленных по этим самым моделям, и скоростей, вычисленных из временных рядов, причём последние использовались в качестве эталона.

Разница горизонтальных скоростей Δ_V вычислялась по формуле:

$$\Delta_V = V_{\text{модель}} - V_{\text{н.врем.ряд}}$$

Модель движения тектонических плит NUVEL-1A является одной из наиболее старых моделей движения плит. Она была разработана в начале 1990 г. Модель NUVEL-1A является уточнённой версией модели NUVEL-1, которая была создана в 1990 г. Суть этого уточнения состоит в том, что на основании полученных данных о времени инверсии геомагнитного поля Земли оказалось возможным сделать вывод о том, что возраст геомагнитных разворотов, используемых в модели NUVEL-1, систематически смещён. Следовательно, угловые скорости в NUVEL-1 тоже имеют систематическую погрешность. Таким образом, модель NUVEL-1A образовалась в результате этой корректировки, которая выражалась в том, что необходимо было умножить все угловые скорости NUVEL-1 на корректировочный коэффициент $\alpha = 0.9562$. Модель NUVEL-1A состоит из 15 тектонических плит.

В табл. 3 представлено распределение пунктов по плитам модели NUVEL-1A. Наибольшее количество пунктов пришлось на Северо-Американскую плиту («na»). Также в данной таблице представлена статистика разностей скоростей, полученных по модели NUVEL-1A и по непрерывному ряду наблюдений. Плитой с наименьшим средним отклонением по абсолютной величине оказалась Северо-Американская плита («na»). Наибольшее среднее отклонение принадлежит плите Наска («nz»). В среднем по всей модели отклонение составило 0.2 мм/год.

На рис. 3 показаны все пункты, использованные в оценке точности, однако цвет маркеров зависит от величины отклонения скорости. Здесь чётко прослеживается зависимость величины отклонения от положения пункта относительно границ плит. Проще говоря, значительная часть больших отклонений возникает на границах тектонических плит, так как именно там идут активные геофизические процессы, и зачастую чётко провести границу между плитами не удаётся.

Проект по созданию модели движения плит MORVEL (DeMets et al., 2010) был начат в конце 1990 г. MORVEL — это набор угловых скоростей и неопределённостей, который описывает геологически недавние движения 25 тектонических плит, которые в совокупности покрывают 97.2 % поверхности Земли. Он построен на основе геофизических, сейсмологических и геодезических данных из архивов и информации исследователей из десятков различных стран. Проект MORVEL был завершён в 2008 г., спустя почти десятилетие интенсивного анализа данных. MORVEL является наиболее полной и самосогласованной оценкой движения плит из когда-либо опубликованных.

Таблица 3

Статистические показатели разностей скоростей, полученных по модели NUVEL-1A, и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений для каждой использованной плиты (N — количество пунктов, по которым производилась оценка)

Плита	$\min_{\Delta v}$, мм/год	$\max_{\Delta v}$, мм/год	$\text{mean}_{\Delta v}$, мм/год	СКО $_{\Delta v}$, мм/год	N
af	-14.0	17.4	-1.3	2.7	251
an	-6.8	18.7	0.6	2.9	81
ar	-12.6	9.6	-2.0	2.7	51
au	-17.2	34.9	0.6	4.6	554
ca	-2.5	23.4	6.6	4.5	125
eu	-22.1	36.0	1.0	6.9	2783
in	-9.9	0.1	-4.5	2.2	22
na	-19.3	35.4	-0.1	4.1	4104
nz	-14.2	5.4	-11.0	3.1	5
pa	-32.3	30.7	-6.2	8.2	539
ph	-34.9	18.4	-2.3	11.3	54
sa	-6.4	33.7	5.1	7.0	335

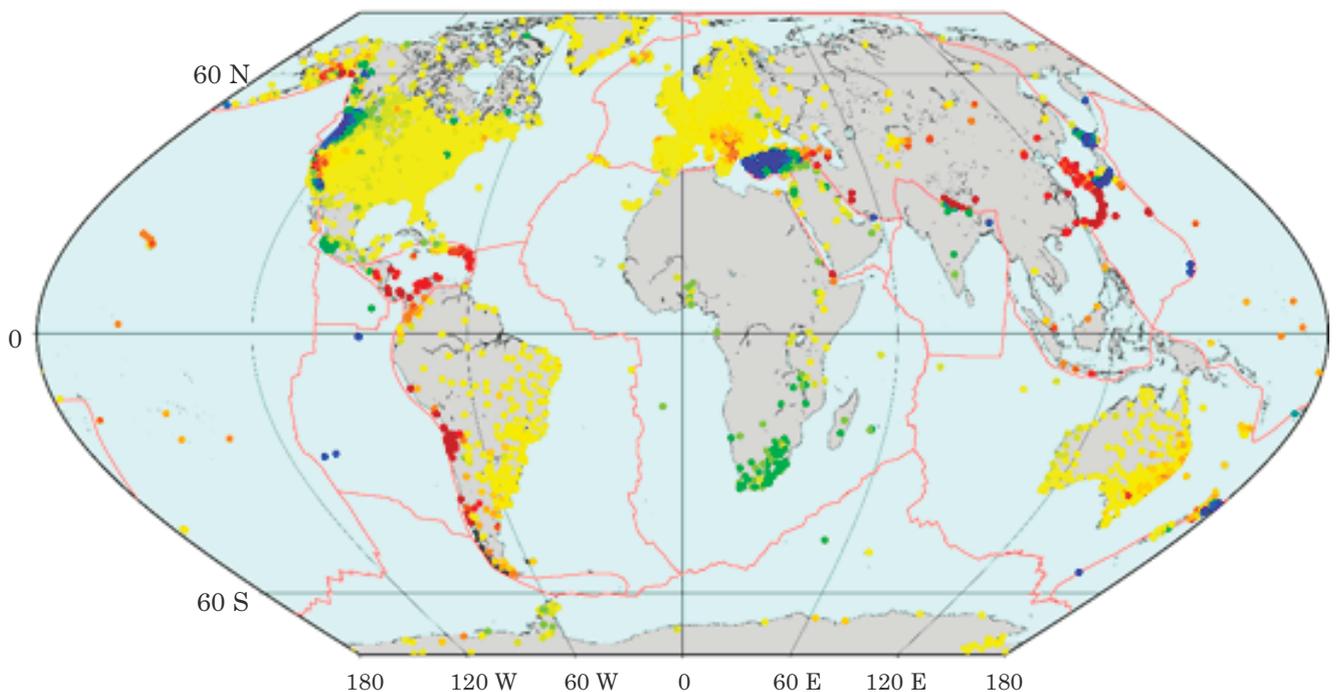
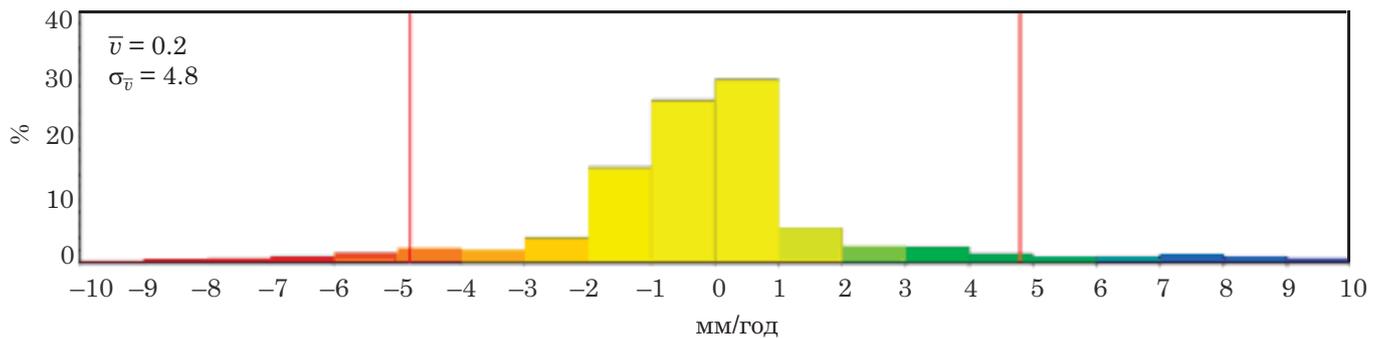


Рис. 3. Отклонение скоростей, полученных по модели NUVEL-1A, от скоростей, вычисленных по временным рядам, а также границы плит данной модели

NNR-MORVEL56 — набор угловых скоростей, которые описывают движения 56 плит относительно системы отсчета без вращения. NNR-MORVEL56 расширяет модель MORVEL, которая покрывает 97.2 % поверхности Земли, на оставшиеся 2.8 % поверхности путем включения 31 дополнительной небольшой плиты. Конструктивно NNR-MORVEL56 дает скорости, идентичные MORVEL для 25 плит, включенных в обе модели. Конфигурация тектонических плит определяется частично из распределения мелких землетрясений с 1963 г. до середины 2008 г. и частично из морфологии поверхности Земли. Землетрясения четко идентифицируют области активного разлома, где относительное движение между различными тектониче-

скими плитами происходит вдоль разломов, которые их разделяют.

При выводе этой модели использовалось 4 вида данных, которые комбинировались между собой:

1. Скорость движения морского дна. Определяется по полосовым магнитным аномалиям, которые находятся вдоль срединно-океанических хребтов.
2. Направление океанических трансформных разломов.
3. Данные, полученные с помощью методов космической геодезии.
4. Направление горизонтального смещения во время землетрясений.

Таблица 4

Статистические показатели разностей скоростей, полученных по модели NNR-MORVEL56, и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений для каждой использованной плиты

Плита	$\min_{\Delta v}$, мм/год	$\max_{\Delta v}$, мм/год	$\text{mean}_{\Delta v}$, мм/год	СКО $_{\Delta v}$, мм/год	N
AP	-13.1	16.1	1.3	7.2	20
AS	-9.5	16.0	0.6	4.2	60
AT	-1.8	20.9	4.0	4.0	68
BU	-21.0	-14.8	-18.5	2.4	4
KE	-31.2	10.5	-5.0	6.8	66
MA	-9.3	1.6	-6.5	5.4	4
ND	0.8	40.9	8.0	7.2	50
OK	-21.3	68.1	-6.0	13.0	160
ON	-18.7	5.5	-6.4	6.4	70
PM	-7.9	10.0	1.2	4.6	14
am	-28.0	19.2	-7.0	10.1	485
an	-7.6	18.7	0.7	3.0	81
ar	-10.7	-1.4	-5.0	1.6	40
au	-14.6	6.1	0.2	1.5	478
ca	-7.8	13.3	-0.3	3.4	88
cp	-6.7	2.9	-3.0	5.1	3
eu	-12.6	48.2	2.9	3.0	1996
in	-10.0	-0.3	-4.3	2.0	18
lw	-4.4	-1.5	-3.3	0.5	34
na	-20.4	64.0	-1.0	3.9	4020
nb	-14.2	5.9	-1.1	2.8	177
nz	-8.6	0.1	-5.5	3.0	5
pa	-36.1	37.0	-9.4	8.7	545
ps	-23.4	4.6	-10.8	7.7	43
sa	-0.6	32.9	6.5	6.9	286
sc	-1.6	-1.4	-1.5	0.1	3
sm	-6.5	12.8	-3.6	3.5	30
su	-17.8	26.7	-3.3	8.9	34
yz	-19.5	-0.1	-2.8	3.4	22

В табл. 4 представлено распределение пунктов по плитам модели NNR-MORVEL56, а также приводятся статистические показатели сравнения скоростей, полученных по модели NNR-MORVEL56, и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений.

Плитой с наименьшим средним отклонением оказалась плита «КЕ». Наибольшее среднее отклонение принадлежит плите «СВ», однако на этой плите находится всего один пункт, что делает показатели этой плиты крайне ненадёжными. Плита, на которую попадает более одного пункта и имеющая максимальное среднее отклонение — «ВU». В среднем по всей модели отклонение составило 0.9 мм/год. На рис. 4, аналогично рис. 3, представлены пункты, цвет маркеров которых зависит от величины отклонения скорости. Здесь, как и в модели NUVEL-1A, практически все наиболь-

шие отклонения находятся на границах тектонических плит.

Модель движения тектонических плит ITRF2014 является сравнительно молодой моделью относительно других, выбранных для сравнения. Она создавалась вместе с системой координат ITRF2014 во второй половине 2010-х годов. Особенностью данной модели является тот факт, что она основана только на геодезических данных. То есть координаты полюсов Эйлера и угловые скорости вращения для плит, входящих в состав модели ITRF2014, вычислены только по данным космической геодезии. Для вычислений использовалось 297 геодезических пунктов.

В связи с этим в этой модели используются только 11 плит, которые не полностью покрывают поверхность Земли. Однако, большинство «белых пятен» приходится на океан.

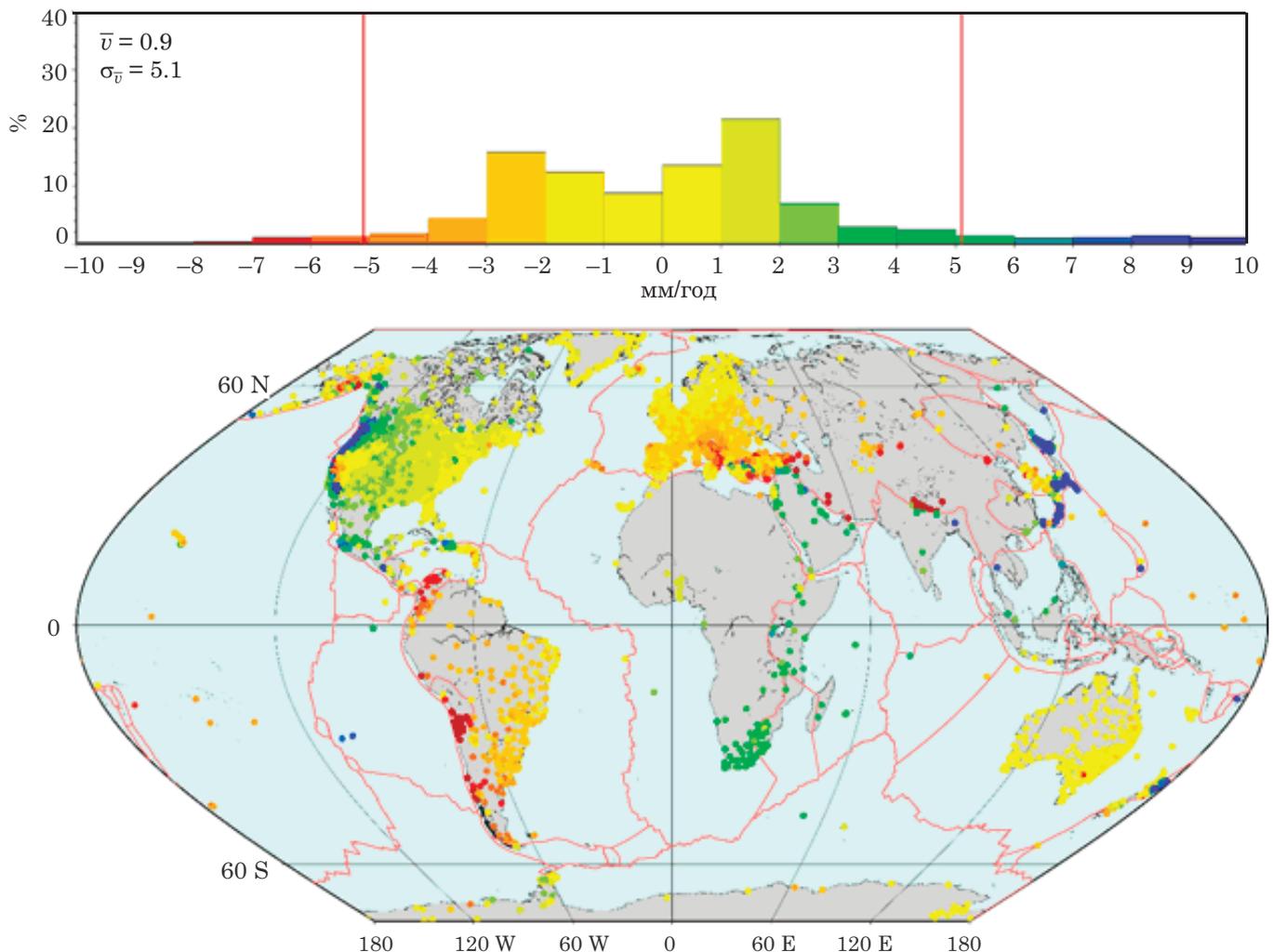


Рис. 4. Отклонение скоростей, полученных по модели NNR-MORVEL56 от скоростей, вычисленных по временным рядам, а также границы плит данной модели

Таблица 5

Статистические показатели разностей скоростей, полученных по модели ITRF2014, и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений для каждой использованной плиты

Плита	$\min_{\Delta v}$, мм/год	$\max_{\Delta v}$, мм/год	$\text{mean}_{\Delta v}$, мм/год	СКО $_{\Delta v}$, мм/год	N
AF	-11.1	6.3	0.8	1.7	177
AN	-3.2	19.1	0.7	3.2	81
AR	-6.8	2.6	-1.1	1.7	40
AU	-15.3	5.9	-0.1	1.6	481
EU	-15.9	45.6	0.6	2.8	1996
IN	-6.3	3.2	-0.7	2.1	18
NA	-18.3	66.3	0.5	3.8	4020
NZ	-1.3	7.4	1.7	3.9	5
PA	-36.6	36.5	-10.7	8.2	545
SA	-3.9	29.4	3.8	6.7	286
SO	-3.2	15.2	-0.5	2.5	64

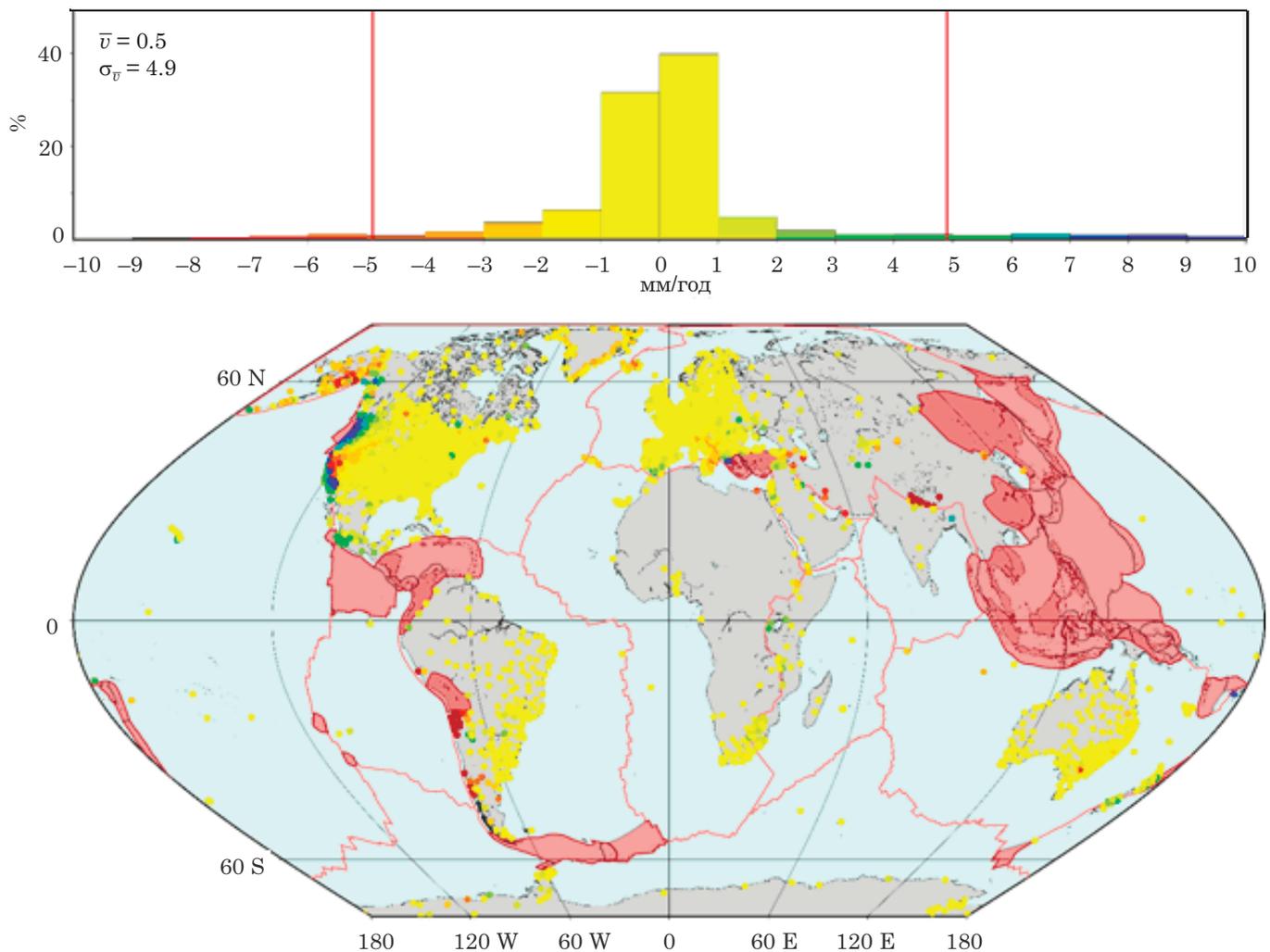


Рис. 5. Отклонение скоростей, полученных по модели ITRF2014 от скоростей, вычисленных по временным рядам, а также границы плит данной модели

В табл. 5 представлено распределение пунктов по плитам модели ITRF2014, а также представлены статистические показатели сравнения скоростей, полученных по модели ITRF2014 и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений. Плитой с наименьшим средним отклонением оказалась плита «РА». Наибольшее среднее отклонение принадлежит плите «СА». В среднем по всей модели отклонение составило — 0.5 мм/год.

На рис. 5 представлена визуализация отклонений получившихся при сравнении скоростей, вычисленных по временному ряду и скоростей, полученных по модели движения тектонических плит ITRF2014.

Модель GSRM v.2.1 основана на горизонтальных геодезических скоростях. Эта Глобальная модель скорости движения литосферных плит значительно превосходит своего предшественника как по объему входных данных, так и по увеличению пространственного разрешения модели примерно в 2.5 раза в областях с плотным покрытием данных.

В рамках работы по созданию данной модели было определено 6739 скоростей из временных рядов (в основном) непрерывных измерений GPS; это одно из самых больших глобальных решений по скорости на сегодняшний день. Было преобразовано 15772 скорости из 233 (в основном) опубликованных исследований, чтобы получить 22511 скоростей в одной системе координат.

В модели акцентируется внимание на исключении скоростей (пунктов), которые подвержены воздействию приграничных явлений. То есть этот набор данных состоит из скоростей, наиболее точно представляющих общеплитовую скорость движения плит.

В данной модели представлено 50 плит, однако приблизительно 14 % земной поверхности не покрыты литосферными плитами. Все эти регионы относятся к границам литосферных плит.

В табл. 6 представлено распределение пунктов по плитам модели GSRM v.2.1, а также представлены статистические показатели сравнения скоростей, полученных по модели GSRM v.2.1, и скоростей, полученных по непрерывному ряду

Таблица 6

Статистические показатели разностей скоростей, полученных по модели GSRM v.2.1, и скоростей, полученных по непрерывному ряду наблюдений для каждой использованной плиты

Плита	$\min_{\Delta v}$, мм/год	$\max_{\Delta v}$, мм/год	$\text{mean}_{\Delta v}$, мм/год	$\text{CKO}_{\Delta v}$, мм/год	N
AP	-7.2	8.3	0.4	5.2	10
AS	-4.2	12.1	0.1	3.2	26
AT	-0.8	12.9	1.0	3.5	44
KE	-16.5	7.6	-2.2	5.6	50
ND	-1.1	16.8	0.9	4.2	20
OK	-12.5	20.4	-3.4	7.3	106
ON	-2.5	5.5	1.7	4.9	53
PM	-4.0	11.2	0.2	5.3	7
am	-12.5	11.1	1.3	3.7	307
an	-4.6	13.3	0.1	3.0	49
ar	-5.7	-0.2	-1.3	1.6	25
au	-6.6	6.5	0.0	1.5	302
ca	-7.0	13.0	-0.3	4.2	48
eu	-8.9	25.5	0.8	4.6	1667
in	-4.4	1.2	-0.5	2.2	8
lw	-3.0	1.9	0.6	3.2	24
na	-15.6	24.0	0.1	3.9	2876
nb	-10.4	3.9	0.4	4.2	106
pa	-11.6	30.0	-0.5	5.3	375
ps	-14.4	6.8	5.5	4.6	21
sa	-0.9	13.7	0.3	3.7	194
sm	-6.5	10.8	-0.3	3.4	17
su	-9.7	15.6	1.4	6.6	12
yz	-4.6	18.5	0.2	3.4	17

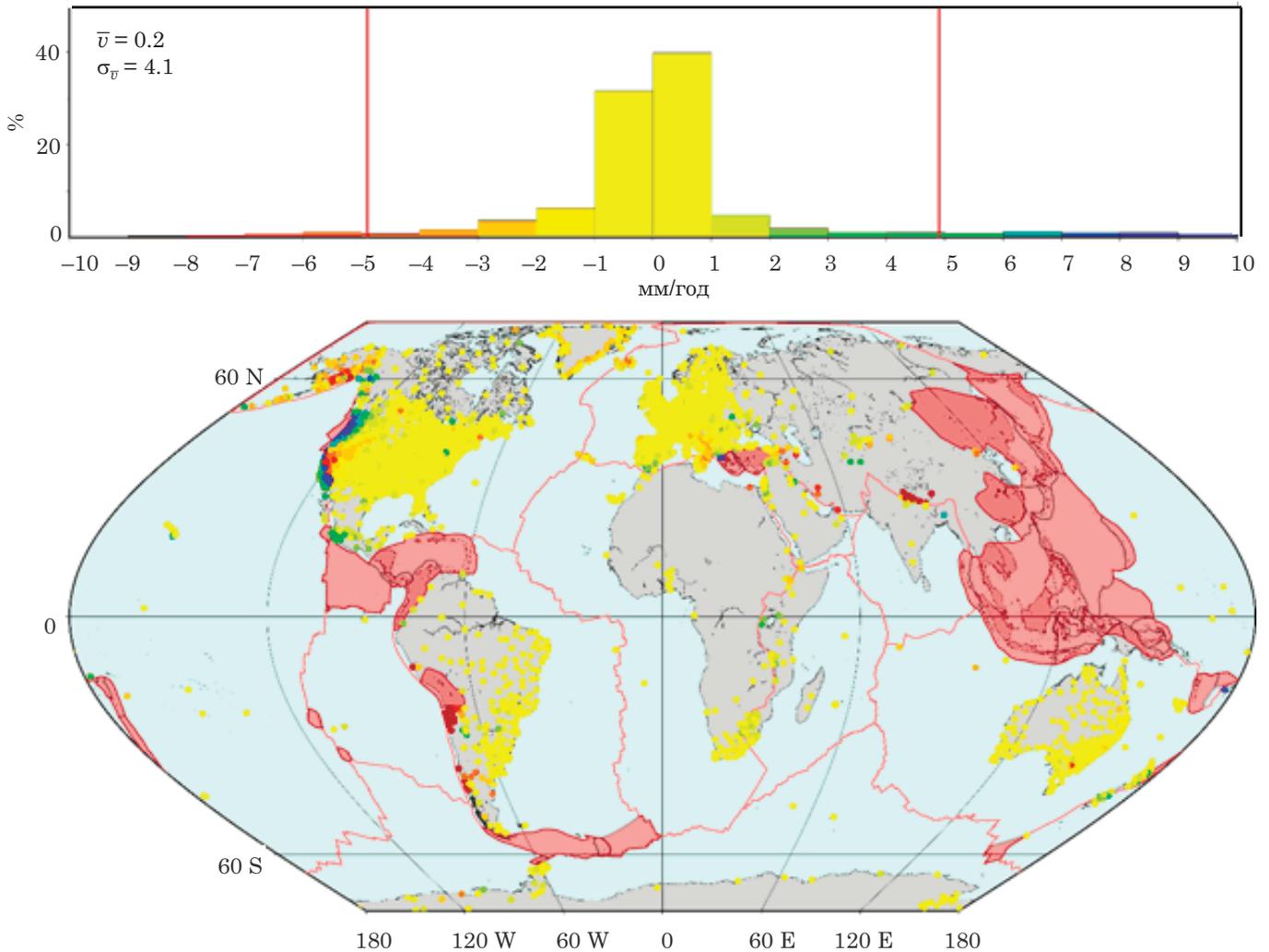


Рис. 6. Отклонение скоростей, полученных по модели GSRM v.2.1 от скоростей, вычисленных по временным рядам, а также границы плит данной модели

наблюдений. плитой с наименьшим средним отклонением оказалась плита «au». Наибольшее среднее отклонение принадлежит плите «rs». В среднем по всей модели отклонение составило — 0.2 мм/год.

На рис. 6 представлена визуализация отклонений, получившихся при сравнении скоростей, вычисленных по временному ряду, и скоростей, полученных по модели движения тектонических плит GSRM v.2.1.

Заключение

Информация о скоростях движения земной поверхности с высокой точностью позволяет оценить тектонические процессы на земной поверхности и служит одной из составных частей современных систем координат. Методы определения скоростей, такие как повторные или непрерывные геодезические измерения, или модели движения тектонических плит, имеют свои достоинства и недостатки. Необходимо уделять особое внимание оценке точности параметров движения пунктов, так как они

влияют на надежность и точность современных систем координат.

В целом рассматриваемые в данном исследовании модели показывают схожий результат, и большинство невязок скоростей для каждой модели не превышают 1–2 мм/год. В то же время каждая из моделей имеет свои особенности. Так, например, модель GSRM v.2.1 показывает самую высокую точность; исходя из этого, можно дать рекомендацию использовать эту модель для вычисления скоростей движения земной поверхности. Однако данная модель покрывает не всю поверхность Земли, и достаточно большие участки территории в данной модели не представлены. В случае если требуется определить скорость движения геодезического пункта на такой территории, рекомендуется использовать другую модель, покрывающую всю поверхность Земли. Здесь авторы рекомендуют модель NNR-MORVEL56, так как эта модель при сопоставимых средних результатах является более детальной в контексте разделения поверхности Земли на литосферные плиты, что позволяет полу-

чить более надёжные результаты для сложно моделируемых территорий.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках НИР «Геокарта-2030» Федерального проекта «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» Государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» на 2021–2030 гг. № 1210806000081-5 (номер ЕГИСУ).

Литература

Бухгольц Н. И. Основной курс теоретической механики. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 468 с.

Ефимов Г. Н., Зубинский В. И., Попадёв В. В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. М.: Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, 2017.

Малкин З. М. Исследование астрономических и геодезических рядов с помощью вариаций Аллана // Кинематика и физика небесных тел. 2011. Т. 27, № 1.

Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121(8). P.6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.

Argus D. F., Gordon R. G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12, no. 11. doi:10.1029/2011GC003751.

Bertiger W., Bar-Sever Y., Dorsey A., Haines B. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research // Advances in Space Research. 2020. Vol. 66, no. 3. P. 469–489.

Blewitt G., Hammond W. C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. Eos Transactions American Geophysical Union 99. 2018. doi: 10.1029/2018EO104623.

DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophysical research letters. 1994. Vol. 21, no. 20. C. 2191–2194.

DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // Geophysical journal international. 2010. Vol. 181, no. 1. P. 1–80.

Estey L. H., Meertens C. M. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data // GPS Solutions. 1999. Vol. 3, no. 1. P. 42–49.

Herring T. A. MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series // GPS Solutions. 2003. Vol 7(3). P. 194–199.

Kreemer C., Blewitt G., Klein E. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 15, no. 10. P. 3849–3889.

Luzum B., Petit G. The IERS Conventions (2010): Reference systems and new models // Proceedings of the International Astronomical Union. 2012. Vol. 10, no. H16. P. 227–228.

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004 // Ocean dynamics. 2006. Vol. 56. P. 394–415.

Williams S. D. P. The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series // Journal of Geodesy. 2003. Vol. 76. P. 483–494. doi: 10.1007/s00190-002-0283-4.