

УДК 551.24:528.02

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДИСКРЕТНЫХ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПЛАТФОРМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Д.А. Симонов¹, В.С. Захаров^{1,2}, С.П. Завьялов¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Университет «Дубна», Московская обл., Дубна

Поступила в редакцию 11.10.16

В работе представлены оригинальные методики выявления дискретных движений блоков земной коры на основании анализа данных глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS). Приводятся результаты анализа данных спутниковой геодезии для геодинамически активных регионов. Отмечены основные сложности применения методик определения современной кинематики дискретных блоков земной коры в относительно стабильных регионах, таких, как платформы. Проведен анализ данных спутниковой геодезии для Северо-Американской платформы, что позволило выявить в ее пределах ряд дискретных кинематически однородных блоков. Дана оценка применимости такого анализа для Восточно-Европейской платформы.

Ключевые слова: геодинамика, кинематика, GNSS, GPS, спутниковая геодезия, блоки земной коры, относительные движения, платформа.

Simonov D.A., Zakharov V.S., Zavalov S.P. Methods for determining of relative motion for discrete blocks of Earth crust using satellite geodesy data and perspectives of their application to platform areas. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2016. Volume 91, part 4–5. P. 78–89.

The paper presents the original methods of discrete movements of crustal blocks detection based on analysis of global navigation satellite systems (GNSS) data. The results of the analysis of satellite geodesy data for geodynamic active regions are presented. Also we analyze the main difficulties of application of these methods for identifying of modern kinematics of discrete blocks of the Earth crust in relatively stable regions, such as the cratons. Our analysis of GPS data for the North American craton revealed a number of discrete kinematically homogeneous blocks within it. Also we made assessment of the possibility to apply such analysis for the East European Platform.

Key words: geodynamics, kinematics, GPS, GNSS, satellite geodesy, crustal blocks, relative motion, platform.

Последние десятилетия все большее распространение получает исследование современной кинематики и деформаций земной коры на основе анализа данных спутниковой геодезии, причем предлагаются сильно отличающиеся друг от друга методики и различный по сложности математический аппарат. Нами разработаны оригинальные методики выявления дискретных движений блоков земной коры на основании анализа данных глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) (Захаров, Симонов, 2010). В предлагаемых нами методиках основой для выделения стабильных на современном этапе участков земной поверхности, интерпретируемых как блоки земной коры, является анализ однородного поля скоростей смещений точек земной поверхности (постоянно действующих станций глобального позиционирования), представленных в единой геодезической системе координат, с последующим подтверждением границ таких блоков на основании комплексного исследования имеющейся для изучаемого района геологической, геоморфологической, сейсмологической, геофизиче-

ской и другой информации. Таким образом, базовой характеристикой для выделения блока являются в первую очередь его кинематическая стабильность и однородность.

Для отработки методик нами использовались данные, полученные по полигонам с высокой плотностью сетей опорных станций GNSS (в основном NAVSTAR GPS) в геодинамически активных регионах (Симонов, Захаров, 2015; Завьялов, Захаров, 2012). Таких полигонов в мире в настоящее время не очень много. Наиболее качественными и плотными являются сети, поддерживаемые Сейсмологической службой Южной Калифорнии (SCEC), Японским метеорологическим агентством (JMA), а также геодинамические полигоны в Киргизии, Северной Италии и др. Причем в свободном доступе находятся только данные SCEC и JMA. Однако следует отметить, что плотности сетей опорных станций постоянно растут и в настоящее время станции Международной службы глобальных навигационных систем (IGS) для ряда территорий достигли такой плотности, что их данные можно использо-

вать для анализа современной кинематики крупных структур — таких, как платформы. Цель настоящей работы — показать возможности выделения блоков земной коры по данным космической геодезии для платформенных областей.

Методика работы

Разработанные нами методики базируются на анализе движений на поверхности сферы, так как прямые векторные операции со значениями скорости пунктов GNSS в локальной системе координат могут привести к существенным ошибкам при исследовании дифференциальных движений. Чаще всего данные о скорости смещения пунктов GNSS приводятся в так называемой локальной декартовой системе координат (топоцентрической), которая имеет три компонента: северный (n), восточный (e) и вертикальный (d): $V = (V_n, V_e, V_d)$. Для выявления кинематически однородного участка на поверхности Земли определяющее значение имеют горизонтальные движения, поэтому скорости вертикальных движений не учитываются при расчетах или полагаются за 0. Для корректного анализа значения скорости переводятся в глобальную геоцентрическую систему координат $V = (V_x, V_y, V_z)$, связанную с центром Земли (Кокс, Харт, 1989).

Движения небольших блоков земной коры могут быть достаточно сложными, и их можно представить как вращение вокруг различных полюсов, подобранных тем или иным методом, или как вращение вокруг внутренней оси, или как комбинацию обоих типов движения. Так как расчет из однородного поля скоростей по всем трем типам движения слишком сложен, то в качестве допущения принимается, что блоки осуществляют поступательное движение по поверхности сферы, т.е. их внутреннее вращение незначительно. Данное допущение является ограничением методики. Для анализа скорости отдельных пунктов GPS применялись стандартные методы расчета положения эйлеровых полюсов по данным о линейной скорости (Зоненшайн, Кузьмин, 1992; Кокс, Харт, 1989). Нами разработаны алгоритмы, позволяющие выделять наборы точек («кластеры»), которые совершают согласованное движение вокруг общего (единого) эйлерова полюса и имеют одинаковую угловую скорость (в пределах заданных ошибок). Определение таких кластеров возможно на основании как простого перебора (Захаров, Симонов, 2010), так и нахождения наилучшего методом наименьших квадратов (Завьялов, Захаров, 2012). Отметим, что в методе простого перебора, для того чтобы выделить кластеры, характеризующиеся наименьшими ошибками, перебор проводится в несколько итераций. Для того чтобы точки относились к полюсу, который обеспечивает наименьшие ошибки, все они проверяются несколько раз. Рассчитываются ошибки определения направления движения и угловой скорости для вращения вокруг каждого из найденных полюсов.

Окончательно точка относится к тому полюсу, для которого указанные ошибки меньше заданных погрешностей и при этом минимальны. На этом этапе внутри выделяемых кластеров могут появляться наборы точек, которые формально относятся к одному полюсу, но фактически расположены в окружении точек, имеющих другой полюс. Это объясняется тем, что эти точки хотя формально и отвечают поставленным условиям, т.е. ошибки минимальны и меньше заданных погрешностей, но фактически, хотя и с незначительно большими ошибками (так же меньшими, чем заданные погрешности), могут быть отнесены к другим кластерам, в большей степени отвечающим геологическому строению. Такая особенность требует внимания исследователя-эксперта и ручного исправления ошибок этого рода с применением комплексного анализа территорий. Таким образом, выделяются совокупности точек поверхности, совершающие в настоящее время согласованное движение, которое можно описать единым вектором угловой скорости. Эти наборы точек и интерпретируются нами как жесткие кинематические блоки (возможно, временные), при этом критерием служит именно согласованность движения. Погрешности в величинах угловой скорости и отклонении векторов задаются с целью учета погрешности исходных данных, а также для того, чтобы до какой-то степени «компенсировать» внутреннее вращение блоков, которое впоследствии может быть выявлено при ручном анализе. Далее, с использованием рассчитанных параметров движения (координаты полюса вращения, угловая скорость) вычисляются относительные движения блоков.

Результаты для геодинамически активных регионов

Описанный выше подход дал хорошие результаты в геодинамически активных регионах с высокими скоростями движений.

Так, в Эгейско-Анатолийском сегменте Альпийского складчатого пояса удалось выделить ряд блоков, имеющих различные полюса вращения и, таким образом, совершающих дифференциальные движения. Причем было показано, что на основании визуального анализа поля скоростей выделить данные блоки было невозможно. Границы выделенных блоков были подтверждены путем анализа рельефа (Захаров, Симонов, 2010).

Основным регионом для тестирования методик была выбрана Южная Калифорния. Этот район отличается очень хорошей и детальной геологической изученностью, и по нему имеется большое количество различных высококачественных данных, позволяющих проводить комплексный анализ. Сеть станций глобального позиционирования здесь одна из самых плотных в мире. Сейсмологическая служба Южной Калифорнии предоставляет одни из самых точных и полных каталогов земле-

трясений, в том числе и с решениями механизмов очагов, что позволяет сопоставлять движения, выявляемые на основе данных глобального позиционирования, с реализованным полем напряжений в сопоставимые периоды. Кроме того, поле скоростей здесь отличается однородностью и скорости смещения достаточно высоки (рис. 1), что дает возможность обоснованно полагать, что ошибки при расчетах будут минимальными.

В результате для Южной Калифорнии удалось построить согласованную модель блокового строения, отвечающую общему структурному плану и геодинамике выбранной территории (Симонов, Захаров, 2015), которая представлена на рис. 2. Полученная блоковая модель отличается от разработанных ранее (McCaffee, 2005; Meade, Hager, 2005 и др.) и, на наш взгляд, лучше отражает особенности современной кинематики блоков. Было показано, что зафиксированные разрывные нарушения далеко не всегда отражают границы кинематически однородных на современном этапе участков земной коры. Более того, попытки проводить границы блоков исключительно по разрывным нару-

шениям могут привести к потере чрезвычайно важной информации о современной кинематике и напряженном состоянии вдоль разломов, которая может быть использована для прогнозирования катастрофических событий, что хорошо видно на примере выделенного нами блока сегмента Мохаве разлома Сан-Андреас.

Следует отметить, что точное определение границ кинематически однородных блоков вызывает значительные трудности и требует кропотливого комплексного анализа дополнительной информации. В частности, для Южной Калифорнии была предпринята попытка подтверждения границ выделяемых блоков при помощи структурно-геоморфологического анализа (Симонов и др., 2015). В результате удалось подтвердить, что разлом Сан-Андреас в пределах сегмента Мохаве от Палмдейла до Лебека зажат в пределах активно развивающегося в новейшее время в обстановке транспрессии сводового поднятия, что указывает на унаследованный транспрессионный характер деформации и может свидетельствовать о возможности возникновения сильных или катастрофических сейсми-

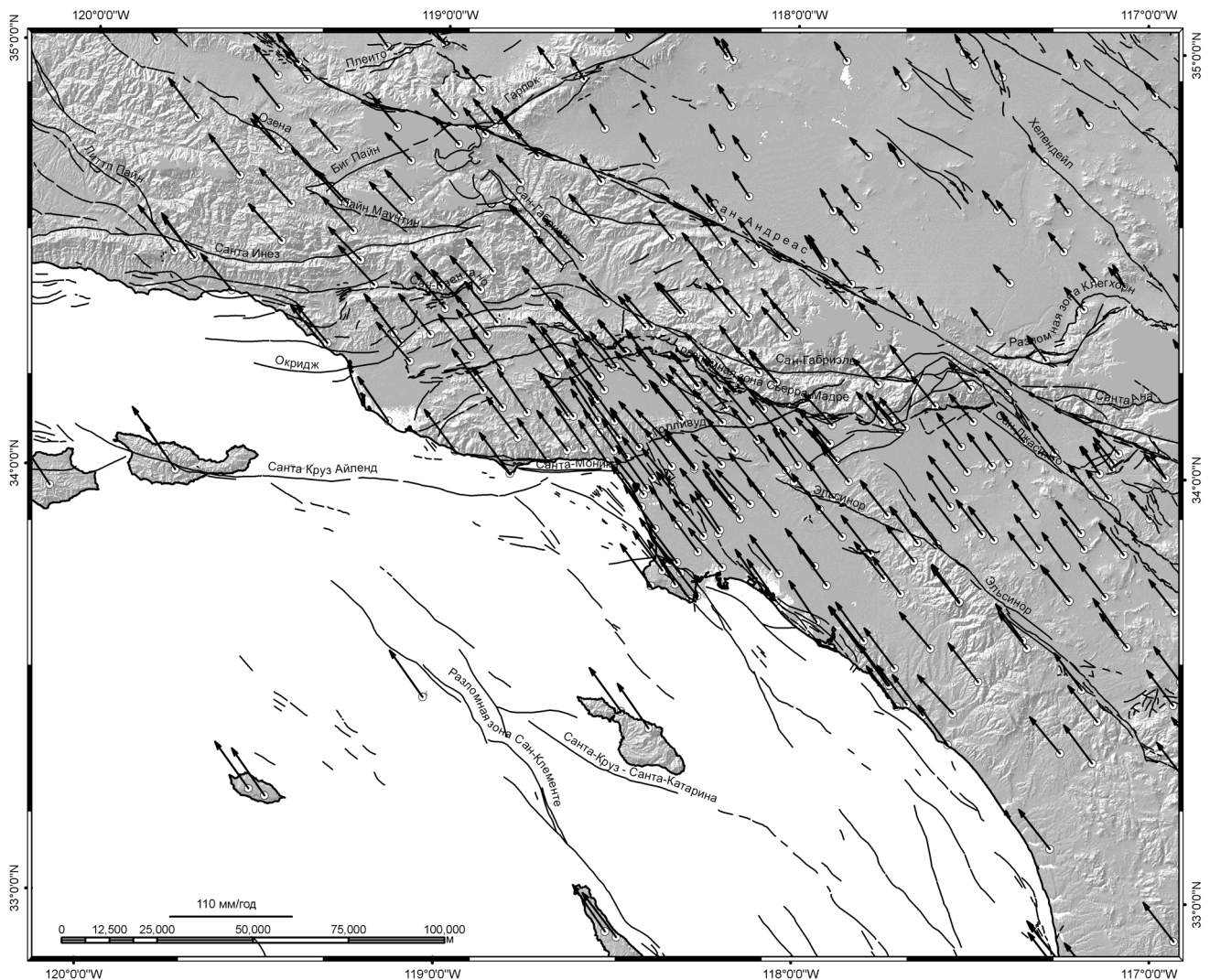


Рис. 1. Исходное поле скоростей GPS, построенных по базе Crustal Motion Model v. 3 (www.scec.org/resources/data), – черные стрелки. Разрывные нарушения – тонкие черные линии, по (Bryant, 2005)

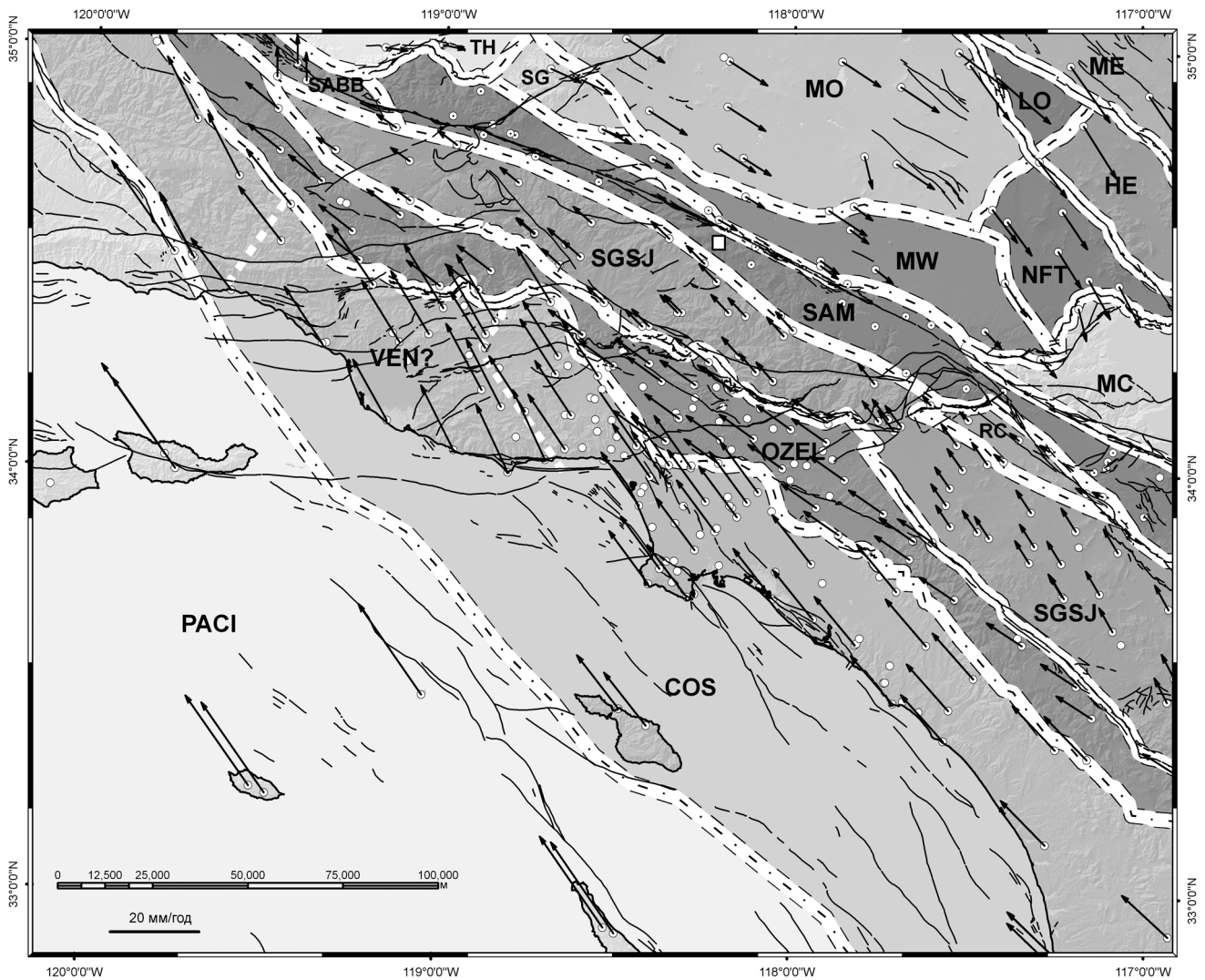


Рис. 2. Кинематическая модель блокового строения Южной Калифорнии, по данным Crustal Motion Model v. 3 (www.scec.org/resources/data). Границы блоков показаны широкими белыми полосами со штрих-пунктирными линиями по центру, черные стрелки – векторы скорости относительно сегмента Мохаве разлома Сан-Андреас, тонкие черные линии – четвертичные и современные разломы, по (Vruant, 2005). Буквами обозначены названия блоков: COS – Прибрежный; HE – Халендейл; LO – Локхарт; MC – Милл-Крик; ME – Восточная Мохаве; MO – Мохаве; MW – Западная Мохаве; NFT – Северных надвигов; OZEL – Озена-Ельсинор; PACI – Тихоокеанский; PR – Сиалто-Колтон; RC – Риалто-Колтон; SABB – Сан-Андреас, сегмент Большого Изгиба; SAM – Сан-Андреас-Мохаве; SG – Южный Гарлок; SGJSJ – Сан-Габриель–Сан-Джасинто; TH – Техачпи, VEN? – Вентура. Значения скорости рассчитаны относительно пункта, показанного на схеме белым квадратом (Симонов, Захаров, 2015)

ческих событий. Часть границ подтверждена по геоморфологическим данным, а некоторые были откорректированы и могут считаться подтвержденными. Однако ряд границ блоков не нашел однозначного подтверждения в выделенных по данным структурно-геоморфологического анализа новейших структурах. Одним из объяснений этого может быть то, что структурный парагенезис сдвиговых зон в обстановке транспрессии развивается во времени, поэтому структуры, формирующиеся на современном этапе, могут либо не успеть проявиться в рельефе, либо могут быть более мелкими и не находить выражения в выбранном масштабе исследований. Вероятно, их можно выделить в результате исследования истории развития рельефа и комплексного анализа другой информации, в том числе по механизмам очагов землетрясений.

Применение методики для платформенных областей

Основные сложности применения методик определения современной кинематики дискретных блоков земной коры в относительно стабильных регионах, таких, как платформы, могут быть связаны в первую очередь с тем, что и относительные, и абсолютные скорости движения земной поверхности в их пределах значительно, часто в разы, ниже скоростей, характерных для геодинамически активных регионов. Вследствие этого гораздо большее влияние на выделение кинематически однородных блоков могут оказывать различные ошибки измерений, связанные как с точностью самих измерений, так и с конструктивными особенностями референтных станций, на которых эти измерения про-

водятся. Абсолютные значения этих ошибок могут быть не очень большими, но в связи с невысокими собственными скоростями точек поверхности их относительные значения зачастую оказываются весьма значительными. Вследствие этого они могут оказывать сильное влияние на получаемую блоковую модель, значительно большее, чем в активных регионах с высокими скоростями. В связи с этим значение критериев качества и однородности используемой сети постоянно действующих станций GNSS значительно возрастает. Поэтому при тестировании разработанной нами методики для геодинамически стабильных областей нами была выбрана сеть станций, поддерживаемых IGS и являющихся основой международной референтной сети ITRF.

Для геодинамически стабильных областей данная сеть наиболее представительна в пределах Северо-Американской платформы, где имеется более трехсот станций IGS (www.igs.org, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005_files.php). Это самая плотная сеть референтных станций IGS в пределах платформ в мире, причем, поскольку данные станции являются опорными для международной сети ITRF 2005, проблемы, связанные с выбором координатной системы, снимаются автоматически и ошибки при пересчете, возникающие при объединении сетей, исключаются. Тем не менее даже эту сеть невозможно считать абсолютно однородной. В первую очередь, необходимо отметить неоднородную плотность сети. Будучи достаточно плотной в пределах США, в более северных районах, в Канаде сеть довольно разрежена. Визуальный анализ поля скоростей для Северо-Американской платформы (рис. 3) показывает, что существует ряд пунктов сети, скорости которых резко выпадают из общего поля скоростей. Наиболее ярким примером может служить вектор скорости, определяющийся для одного из пунктов, расположенных на севере штата Миннесота, недалеко от границы США и Канады. Также обращают на себя внимание векторы скоростей для ряда пунктов прибрежных областей штатов Техас и Флорида, где для пространственно очень близких пунктов определяются существенно отличающиеся как по направлению, так и по величине вектора скорости.

Такие аномалии, скорее всего, связаны не с тектоническими движениями, а с техническими проблемами установки и эксплуатации базовых станций в этих пунктах или с поверхностными инженерно-геологическими процессами, которые не были учтены при установке оборудования. В любом случае, при детальном анализе такие аномалии требуют отдельного изучения и дополнительной «чистки» базы данных по скоростям, определяемым в сети. Не располагая информацией подобного рода при проведении данного исследования, мы не стали исключать такие станции из рассмотрения, что, конечно, повлияло на результат, но незначительно. В большинстве случаев алгоритм выделения кинематически однородных блоков автоматически исклю-

чил наиболее аномальные значения из кластеризации, не найдя для них общего эйлера полюса ни с одной из других станций сети. Там, где данные аномалии были менее значительными, пункты были ошибочно отнесены к другим блокам, т.е. возникла ситуация, описанная выше при изложении метода простого перебора при выделении кинематически однородных кластеров. Таких ситуаций оказалось немного, и они все достаточно уверенно могут быть проанализированы визуально.

Оценить значения погрешностей, задаваемых при кластеризации, на основании анализа поля скоростей оказалось затруднительным из-за невозможности количественно оценить величину ошибок, получаемых за счет инженерных и инженерно-геологических проблем. Причем при небольших величинах абсолютных (относительно ITRF 2005) и относительных скоростей величина этого параметра оказывает критическое влияние. Так, при задании погрешностей в 5% в значении угловой скорости и 5° в направлении вектора скорости на поверхности сколько-нибудь консолидированные блоки не выделялись и картина становилась абсолютно хаотичной. При задании больших погрешностей вследствие того, что возможность внутреннего вращения блоков в таких стабильных областях весьма ограничена, рассчитывался усредненный полюс для всей Северо-Американской платформы (рис. 4). Долгота рассчитанного полюса составляет $89,8^\circ$ з.д., а широта $9,91^\circ$ ю.ш., что несколько южнее, чем получено другими исследователями для Северо-Американской плиты (Altamimi et al., 2002; Beavan et al., 2002; Marquez-Azua, DeMets, 2003; Fernandes et al., 2004, и др.). Следует отметить, что эти расхождения, вероятно, связаны с тем, что при определении общего полюса мы не исключали пункты, расположенные в пределах областей с интенсивным гляциоизостатическим поднятием, а также не удаляли из анализа данные с аномальными для общего поля скоростей значениями, т.е. использовали данные со всех станций сети, что могло оказать некоторое влияние на расчет осредненного полюса.

Наиболее оптимальными для используемой в данном исследовании сети допусками ошибок при кластеризации в методе простого перебора оказались ограничения в 10% по угловой скорости и в 10° в отклонении линейного вектора скорости. При этих допусках блоковое строение не загроублялось, т.е. удалось достаточно уверенно выделить максимальное количество кинематически однородных блоков и в то же время почти избежать «смешивания» при выделении блоков из-за чрезмерного влияния ошибок определения скорости, имеющих различное происхождение. В результате в пределах Северо-Американской платформы удалось уверенно выделить четыре кинематически однородных блока (рис. 5), причем два из них хотя и разнесены в пространстве, но имеют общий полюс вращения, обозначенный нами как № 1 (рис. 4),

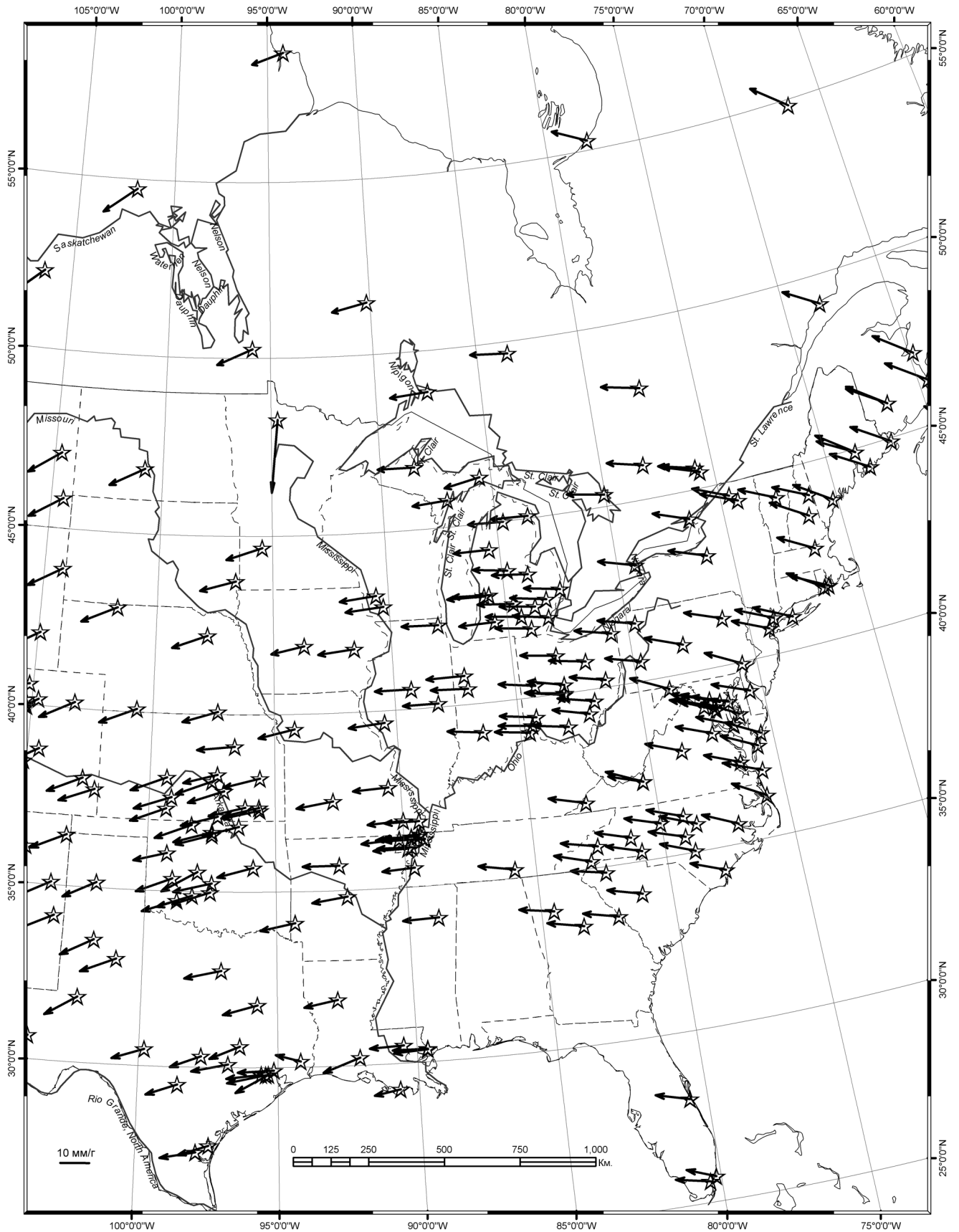


Рис. 3. Поле скоростей пунктов Глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), по данным Международной службы глобальных навигационных спутниковых систем (IGS) в координатной системе ITRF 2005 для Северо-Американской платформы

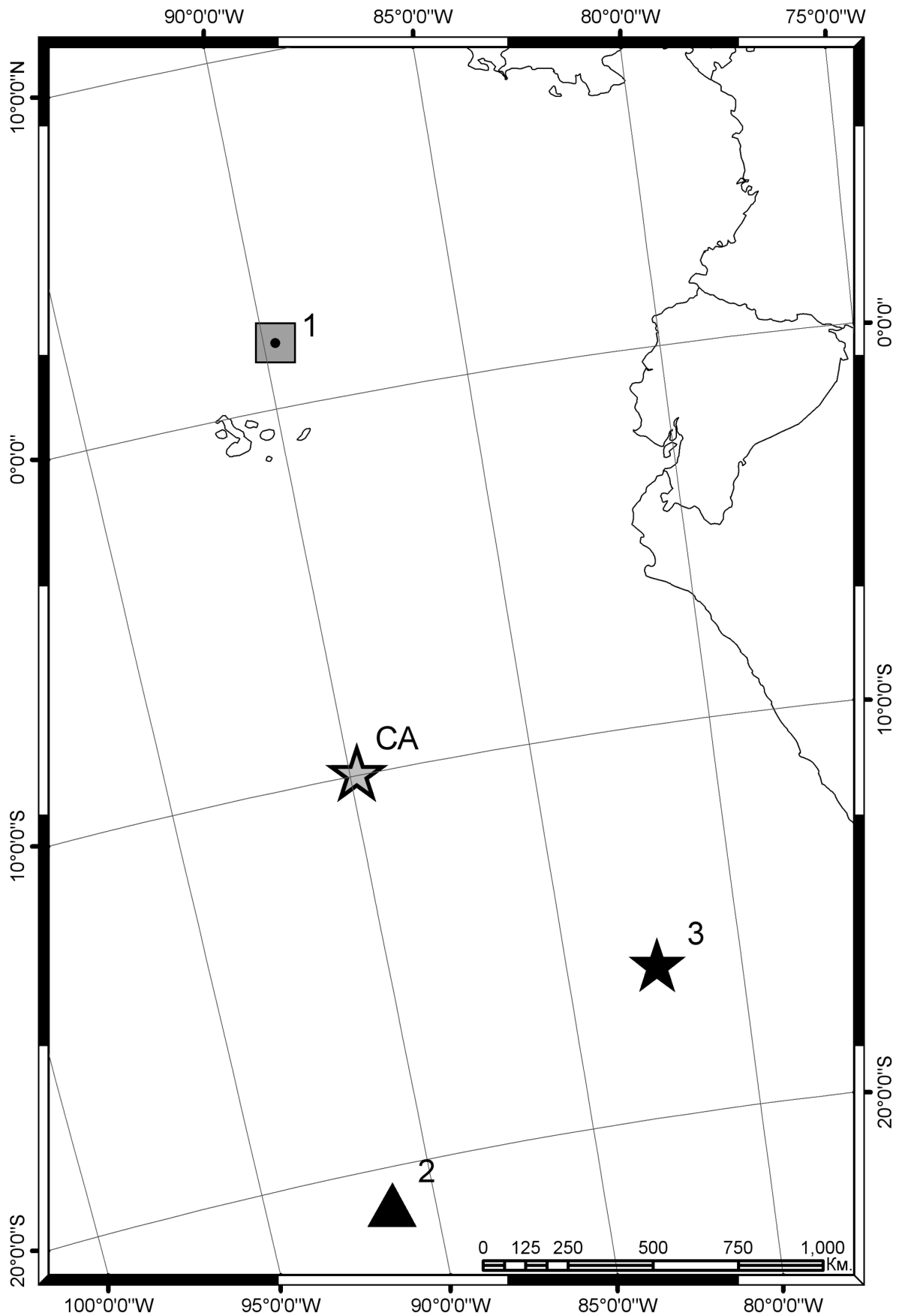


Рис. 4. Местоположение полюсов вращения, выделенных при анализе поля скоростей сети IGS INRF 2005 кинематически однородных блоков (1 – блок, охватывающий почти всю территорию Северо-Американской платформы к западу от рек Миссисипи и Огайо и к югу от границы США и Канады; 2 – блок штатов восточного побережья США к востоку от рек Миссисипи и Огайо и Великих озер; 3 – блок Канады и северной части штата Мичиган), а также усредненного полюса для Северо-Американской платформы (CA)

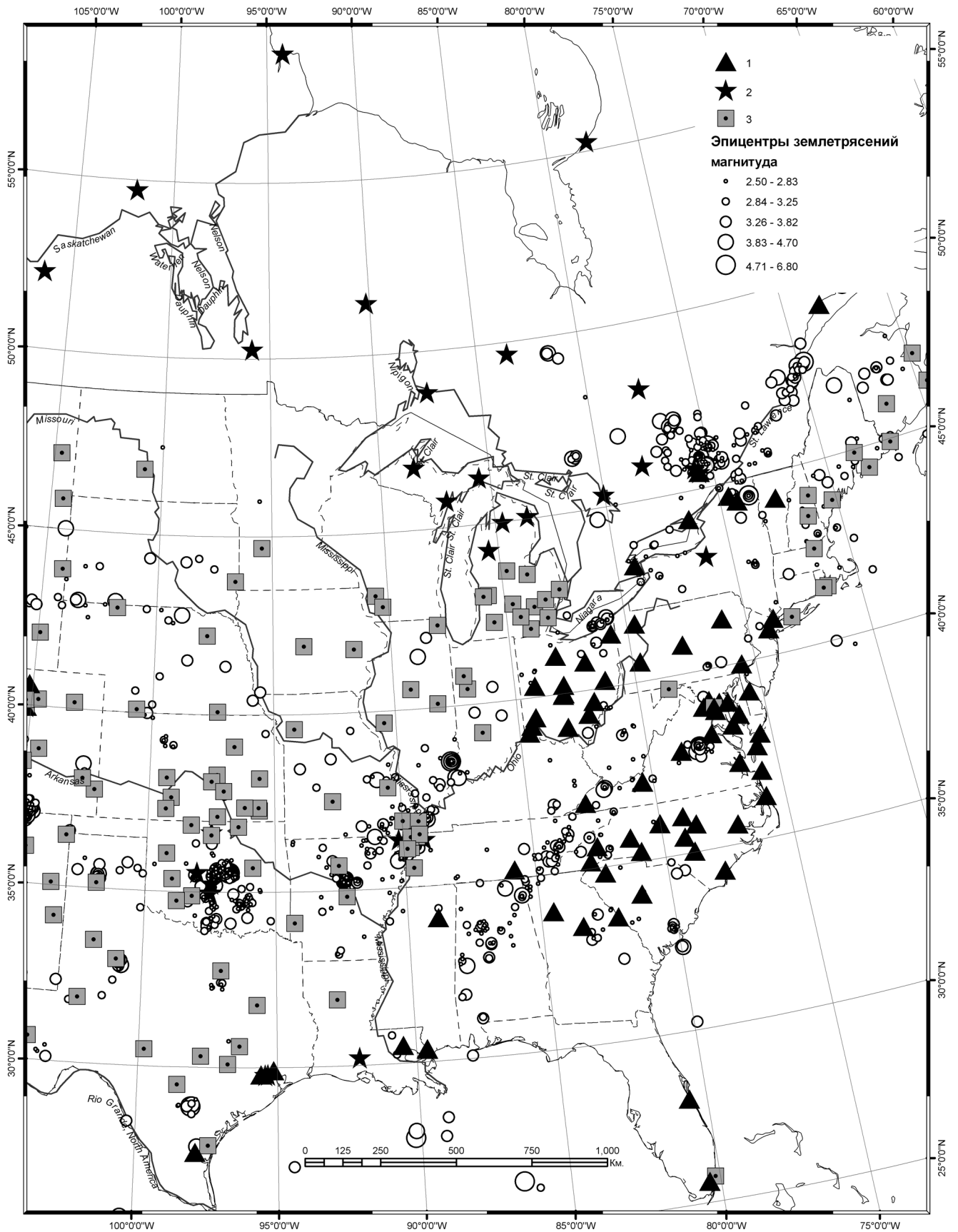


Рис 5. Кинематически однородные блоки, выделенные в пределах Северо-Американской платформы по результатам анализа поля скоростей сети IGS ITRF 2005. Условные обозначения для блоков соответствуют условным обозначениям полюсов блоков на рис. 4

с координатами $89,7^\circ$ з.д. и $1,8^\circ$ ю.ш. Это наиболее крупный блок, охватывающий практически всю территорию платформы к западу от рек Миссисипи и Огайо и к югу от границы Канады и США. Полус вращения для этого блока находится в той же области, в которой большинством исследователей определяется полюс вращения для Северо-Американской платформы. Надо отметить, что при определении данного полюса обычно исключаются из рассмотрения пункты, находящиеся в пределах областей гляциоизостатического поднятия, и практически рассматриваются пункты, по большей части находящиеся в пределах выделенного нами блока.

Тот же полюс вращения имеет еще один консолидированный кинематически однородный кластер, который гораздо меньше предыдущего и расположен вдоль восточного побережья США в пределах штатов Коннектикут, Массачусетс, Нью-Гэмпшир и Мэн, а также провинции Нью-Брансуик Канады. Следует отметить, что этот блок, в отличие от предыдущего, попадает в области с выраженным гляциоизостатическим поднятием. Выделение данного блока требует дальнейшего, более детального изучения, так как большая часть его точек, за исключением нескольких, расположенных непосредственно на побережье, может быть отнесена и к блоку, описанному ниже. Поэтому можно предположить, что появление этого кинематически однородного кластера при анализе может быть связано с погрешностями определения векторов скорости, описанными выше, и без убедительного подтверждения по геологическим и геоморфологическим данным его нельзя уверенно интерпретировать именно как блок земной коры. То, что данный блок имеет тот же полюс вращения, что и предыдущий, объясняется сходными параметрами движения.

Между описанными выше блоками выделяется достаточно крупный блок, объединяющий пространство, занимаемое практически всеми штатами восточного побережья США к западу от рек Миссисипи, Огайо и Великих озер (рис. 5). Полюс вращения этого блока, обозначенный нами № 2, находится значительно южнее: $89,7^\circ$ з.д., $20,95^\circ$ ю.ш. (рис. 4). Граница между данным блоком и блоком, занимающим центральную и юго-западную части платформы, проходит по линейной зоне через спрямленный участок долины р. Миссисипи северо-восточного простираения в ее среднем течении (вдоль Рилфутской рифтовой зоны), уходящей дальше к северо-востоку, к озерам Эри, Онтарио и далее к заливу св. Лаврентия, имеющему то же простираение. С этой зоной, по данным каталога сейсмичности Геологической службы США за 2000–2012 гг. (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>), связаны две линейно вытянутые зоны повышенной сейсмичности (рис. 5): одна приурочена к заливу св. Лаврентия, а вторая простирается вдоль спрямленной части долины р. Миссисипи в районе слияния с р. Онтарио (известная Нью-Мадридская

сейсмическая зона). К данной зоне приурочено, в частности, и катастрофическое Нью-Мадридское землетрясение 1812 г. Важно отметить, что эти блоки и граница между ними имеют тектоническую природу и выделяются независимо от того, находятся ли области в пределах зоны с активной гляциоизостазией или вне ее, и, скорее всего, отражают современную активность вдоль Рилфутской рифтовой системы и ее продолжения на северо-восток.

Последним консолидированным кинематически однородным блоком, выделившимся при заданных параметрах кластеризации, можно назвать обширное пространство, занимающее почти всю Канаду и северную часть штата Мичиган (рис. 5). Этот блок целиком расположен в области активного гляциоизостатического поднятия и охарактеризован плохо вследствие низкой плотности сети базовых станций в его пределах. Полюс его вращения, обозначенный нами как № 3 (рис. 4), расположен к северо-востоку от полюса описанного выше блока и имеет координаты $82,41^\circ$ з.д., $16,14^\circ$ ю.ш., что так же значительно отличается от положения усредненного полюса для Северо-Американской платформы.

Таким образом, предварительный анализ современной кинематики дискретных кинематически однородных блоков в пределах Северо-Американской платформы дал удовлетворительный результат и показал возможность применения разрабатываемых нами методик в пределах геодинамически стабильных областей для выявления и подтверждения активности на современном этапе структур древнего заложения, таких, как погребенные рифты и авлакогены, а также их влияния на современные геодинамические процессы. В связи с этим актуальным становится вопрос применения методики и для других регионов, в том числе и для Восточно-Европейской платформы.

Возможности применения метода для Восточно-Европейской платформы

К сожалению, однородных сетей с достаточным количеством базовых станций в пределах других платформенных областей мало. Так, для Восточно-Европейской платформы (ВЕП), в пределах Российской Федерации к сети IGS-ITRF относятся только четыре референтные станции, а с учетом сопредельных государств — не более двух десятков (рис. 6). Такого количества станций для геодинамического анализа недостаточно. Однако сети опорных референтных станций GNSS (NAVSTAR, ГЛОНАСС) в пределах ВЕП активно развиваются, что дает потенциальную возможность применения разрабатываемых методик и здесь, однако существует ряд проблем.

На ВЕП развиваются только сети для решения прикладных геодезических задач. К таким задачам

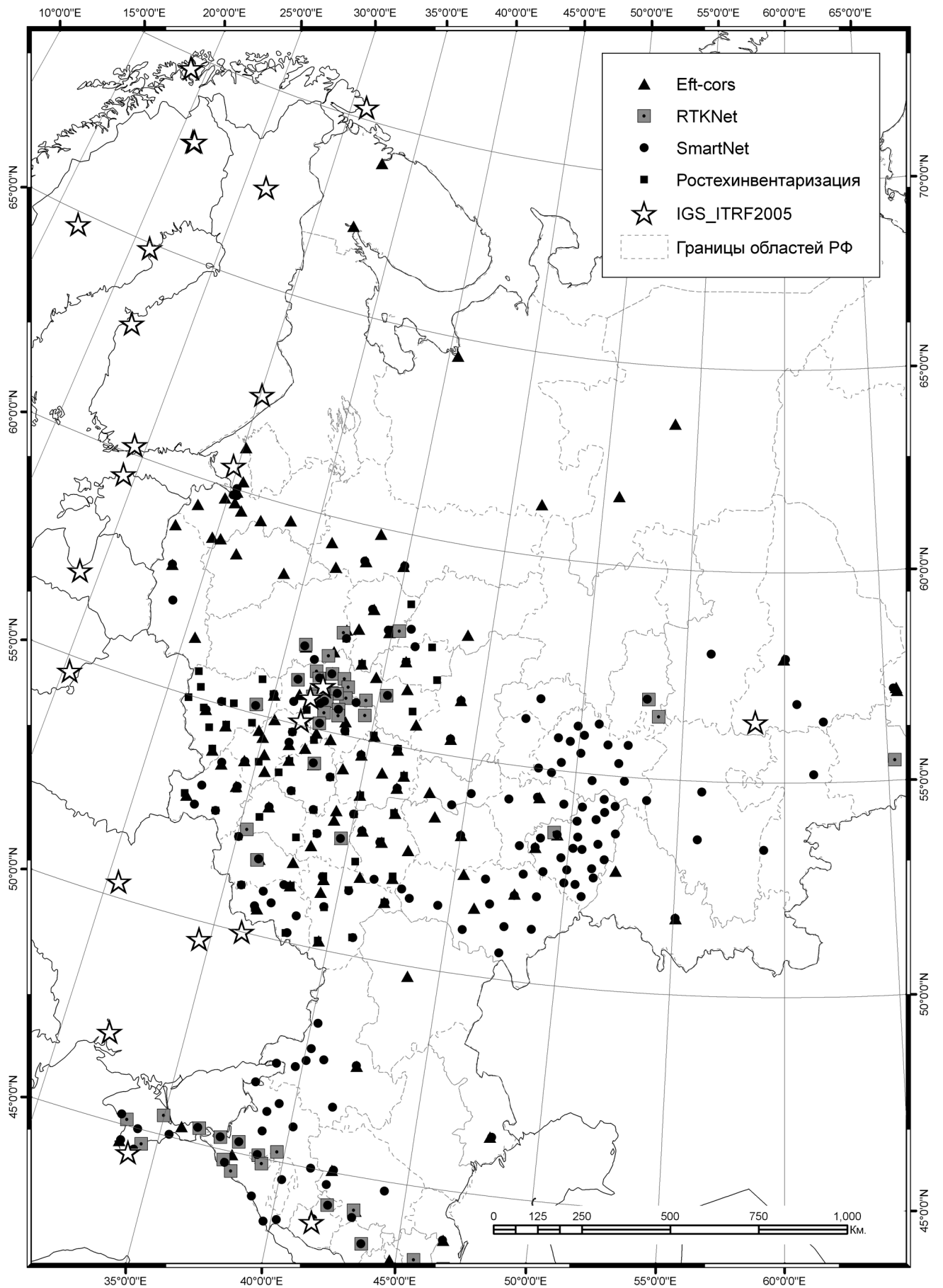


Рис. 6. Схема расположения доступных в пределах Восточно-Европейской платформы сетей точного положения Глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и их собственники

можно отнести геодезические изыскания и топографические съемки, создание исходной геодезической основы, определение координат пунктов геодезических сетей, инвентаризацию земель и землеустройство, мониторинг недропользования, проектные и изыскательские работы, исполнительные съемки, обеспечение строительства гражданских и промышленных объектов, автомобильных и железных дорог, трубопроводов, линий электропередач, организация лесоустройства и лесопользования, мониторинга лесозаготовок, ликвидации лесных пожаров и оценки ущерба, точное земледелие, оснащение коммунального хозяйства и ряд других задач, представляющих в основном коммерческий интерес и интересы муниципальных служб. Исходя из перечисленных выше задач можно предположить, что основным потребителям предоставляемых этими сетями данных необходима прежде всего информация для уточнения координат в реальном времени либо для камеральной обработки данных полевой геодезической съемки, т.е. собственники сетей не заинтересованы в сборе и хранении огромных объемов информации, которую можно использовать для сверхточного отслеживания изменения координат самих базовых станций, поскольку они не нужны для решения приоритетных коммерческих задач. Более того, финансирование создания и обслуживания таких сетей только на 23% ведется из федерального бюджета, 58% — это бюджет различных региональных ведомств, муниципальных унитарных предприятий и 19% — это средства частных компаний, как правило, поставщиков спутникового оборудования ведущих зарубежных производителей, осуществляющих последующее обслуживание этого оборудования (Евстафьев, 2012). Это означает, что каждая из сетей может работать в своей, удобной для собственника координатной системе. Очень неоднородна и плотность имеющихся сетей. Так, даже по геодезическим стандартам, для динамически точного определения координат с сантиметровой точностью расстояние между базовыми станциями не должно превышать 50–60 км, но оно не всегда соблюдается даже в центральных, близких к Москве областях. В малонаселенных же районах с низкой интенсивностью хозяйственной деятельности содержание базовых станций нерентабельно для коммерческих организаций и муниципальных учреждений и не финансируется на федеральном уровне, поэтому количество станций там крайне мало (рис. 6).

По состоянию на 2012 г., спутниковые системы точного позиционирования на основе отдельных сетей референтных станций в пределах ВЕП (Евстафьев, 2012) развернуты в Московской, Калужской, Кировской, Тверской, Тульской, Мурманской, Смоленской, Калининградской областях, в Москве и Архангельске, причем у всех этих сетей разные собственники. Такое положение дел создает определенные трудности даже при решении уже опи-

санных выше прикладных геодезических задач, поэтому некоторые коммерческие организации предпринимают попытки объединения этих сетей в более крупные сети с единой системой координат. По данным ООО «Аспект» (www.aspector.ru), оказывающего услуги по регистрации и подключению абонентов к сетям базовых станций, на территории Российской Федерации на сегодняшний день имеется как минимум четыре таких сети (рис. 6), объединяющие в пределах ВЕП не менее 200 базовых станций, что, как было показано выше на примере Северо-Американской платформы, могло бы быть достаточным для решения определенных геодинамических задач. Однако собственники сетей не предоставляют информацию по изменению координат (скоростей движения) базовых станций.

Примером решения этой проблемы может служить сеть CORS Национальной геодезической службы США (NGS), созданная путем кооперации правительственных, академических и частных организаций. Ее станции или подсети управляются независимо, но каждый владелец предоставляет свои данные службе NGS, а та, в свою очередь, анализирует и распространяет данные, в том числе и информацию по изменению координат станций относительно единой для всей сети референтной системы координат, бесплатно. По состоянию на август 2015 г., сеть CORS объединяла более 2000 станций и более 200 различных организаций (<http://geodesy.noaa.gov/CORS/>).

Подобного проекта в Российской Федерации на настоящий момент не существует, что делает использование имеющихся сетей базовых референтных станций для геодинамических целей затруднительным.

Заключение

Для разных геодинамических обстановок протестированы математические методы и программное обеспечение для создания дискретных кинематических моделей отдельных регионов по данным GPS с учетом сферичности поверхности Земли. Проведенные ранее исследования показали, что разработанные алгоритмы дают хорошие результаты в геодинамически активных регионах с высокими скоростями движений, таких, как Калифорния и Япония, и могут служить для выявления небольших подвижных блоков, отражающих внутреннюю, дифференцированную кинематику достаточно мелких структурных элементов.

Применение наших алгоритмов к анализу современной кинематики в пределах платформенных областей (на примере Северо-Американской платформы) также дает удовлетворительный результат и позволяет выявить ряд дискретных кинематически однородных блоков. Показана возможность использования разработанных нами методик для

выявления и подтверждения активности на современном этапе структур древнего заложения, таких, как погребенные рифты и авлакогены, а также их влияния на современные геодинамические и сейсмотектонические процессы.

Применение этих методик к другим платформенным областям, в частности к ВЕП, сталкивается с рядом проблем, связанных с недостатком или недоступностью данных, а также сложностью объединения разрозненных сетей.

Точное установление геологических границ блоков земной коры, определяемых при анализе поля скоростей смещения пунктов на поверхности как кинематически однородных блоков, нуждается в кропотливом комплексном анализе дополнительной информации о геологическом строении, морфологии рельефа, геофизических полях, особенностях проявления сейсмичности и др. Решение данной задачи в пределах платформенных областей требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Евстафьев О.В.* Тенденции и проблемы развития спутниковых СТП в России // *Геопрофи.* 2012. № 3. С. 9–13.
- Завьялов С.П., Захаров В.С.* Блоковая структура земной коры по данным GPS // *Геологическая среда, минерагенические и сейсмотектонические процессы.* Мат-лы XVIII междунар. научно-практич. конф. 24–29 сентября 2012 года. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 126–130.
- Захаров В.С., Симонов Д.А.* Анализ современных дискретных движений блоков земной коры геодинамически активных областей по данным GPS // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол.* 2010. № 3. С. 25–31.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.* Палеогеодинамика. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Кокс А., Харт Р.* Тектоника плит. М.: Мир, 1989. 427 с.
- Симонов Д.А., Брянцева Г.В., Трост П.А.* Структурно-геоморфологический анализ сдвиговых зон Южной Калифорнии // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол.* 2015. № 6. С. 1–12.
- Симонов Д.А., Захаров В.С.* Блоковое строение Южной Калифорнии по результатам анализа данных GPS // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол.* 2015. № 3. С. 21–31.
- Altamimi Z., Sillard P., Boucher C.* ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science applications // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, N B10. DOI: 10.1029/2001JB000561.
- Beavan J., Tregoning P., Bevis M.* et al. Motion and rigidity of the Pacific Plate and implications for plate boundary deformation // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, N B10. DOI: 10.1029/2001JB000282.
- Bryant W.A.* (compiler). Digital database of Quaternary and younger faults from the Fault activity map of California, version 2.0. California Geological Survey, 2005. URL: http://www.consrv.ca.gov/CGS/information/publications/QuaternaryFaults_ver2.htm 10.05.2010
- Fernandes R.M.S., Ambrosius B.A.C., Noomen R.* et al. Angular velocities of Nubia and Somalia from continuous GPS data: Implications on present day relative kinematics // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 222. P. 197–208.
- Marquez-Azua B., DeMets C.* Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, N B9. DOI: 10.1029/2002JB002241.
- McCaffrey R.* Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, N B07401. DOI: 10.1029/2004JB003307.
- Meade B.J., Hager B.H.* Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, N B03403. DOI: 10.1029/2004JB003209.

Сведения об авторах: *Симонов Дмитрий Андреевич* – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail:* simon@geol.msu.ru; *Захаров Владимир Сергеевич* – докт. геол.-минерал. наук, доцент каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail:* zakharov@geol.msu.ru; *Завьялов Сергей Петрович* – аспирант каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail:* serhantes91@gmail.com