

Кинематика движения материков Земли

© Г.М. Стеблов, Д.И. Фролов*, В.С. Куксенко*

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева Российской академии наук,
123810 Москва, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

Методом точной спутниковой геодезии (GPS) исследовались движения районов северо-востока Евразии. Результаты наблюдений анализировались с привлечением международной базы данных. Несмотря на небольшую продолжительность наблюдений (~ 6 лет), обнаружены направления движений основных регионов Евразии и Северной Америки, оценены скорости движения. Результаты исследований обсуждаются с общих позиций деформации и разрушения твердых тел.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 04-05-65287, 03-05-6483).

Настоящая работа посвящена изучению современных данных о движении определенных областей земной коры. Тот факт, что огромные материки находятся в постоянном движении, можно объяснить с помощью двух фундаментальных концепций.

1) Источником перемещения континентов являются конвекционные процессы, протекающие в глубинных слоях мантии.

2) Перемещение плит происходит с определенными скоростями, причем на границах плит эти локальные скорости могут быть существенно выше. Данное обстоятельство позволяет рассматривать этот процесс с позиций кинетических представлений, что дает возможность использовать богатый опыт кинетики деформирования твердых тел.

Если первое положение достаточно широко обсуждается в научной литературе, то вторая концепция пока остается в тени, поскольку для решения этой физической проблемы недостаточно данных. Мы попытаемся представить имеющиеся оригинальные результаты с позиций кинетических представлений о разрушении и деформировании твердых тел, к которым относится и земная кора.

Переход от микроуровня к макроуровню в процессах деформирования и разрушения был подтвержден во многих экспериментах [1,2]. Эксперименты, описанные в настоящей работе, несмотря на небольшую продолжительность наблюдений, свидетельствуют об универсальности некоторых понятий и служат началом исследований процессов деформирования на больших масштабах.

1. Постановка задачи исследований

Идеи тектоники литосферных плит развивались в 60-е годы XX века и были представлены в виде фундаментальной концепции в 1968 г. Морганом, а также Мак Кензи и ЛеПишоном. Представление о строении верхних слоев земной поверхности в виде мозаичного набора твердых фрагментов — плит, постоянно находящихся в состоянии взаимного движения, — явилось

естественным следствием изучения тепловой конвекции в мантии и физико-химического анализа коромантийного взаимодействия. Именно такие механизмы позволили объяснить динамику движения плит, так как для этого необходимы источники энергии достаточной мощности, способные быть движущей силой столь масштабных явлений. Современные, так называемые „геологические“ модели движения плит были созданы на основе анализа трех типов данных: полосовые магнитные аномалии в океанах; азимуты трансформных разломов в осевых зонах срединно-океанических хребтов; азимуты векторов смещений по разрывам при землетрясениях в зонах субдукции. По совокупности этих данных были определены векторы относительного вращения плит с осреднением за последние 3 млн лет.

Существует несколько серьезных вопросов, связанных с геологическими моделями плит.

1) Можно ли рассматривать средние за 3 млн лет скорости в качестве современных?

2) Какова реальная точность геологических моделей? Этот вопрос связан с тем, что модели основаны на информации только по океаническим областям?

Прямые измерения современными геодезическими методами позволяют построить объективную модель современных движений земной коры.

Цель настоящей работы — выявление и уточнение малоизученных границ между Евразийской и Североамериканской тектоническими плитами, а также оценка скоростей их взаимного движения.

2. Постановка эксперимента

Развитие методов спутниковой геодезии внесло существенный, часто решающий вклад в современные исследования геодинамических процессов. Усовершенствование спутниковых технологий позволило достичь высокой точности измерения больших расстояний на земной поверхности, что практически невозможно обеспечить с помощью методов классической геодезии (триангуляции, светодальнометрии, нивелировки и т. п.). Эти

методы позволяли проводить достаточно точные наземные измерения лишь в крайне ограниченном локальном масштабе расстояний (обычно в пределах прямой видимости). Это не позволяло изучить крупномасштабные геодинамические процессы в силу невозможности исключения накопления ошибок в процессе развертывания и уравнивания геодезических сетей. Точность в 1–2 мм при определении взаимного положения точек на земной поверхности, удаленных друг от друга на тысячи километров, впервые позволила сравнить взаимное положение удаленных фрагментов земной поверхности за несколько лет и выявить их относительное движение, скорость которого в среднем составляет несколько десятков миллиметров в год.

Система GPS (Глобальная система позиционирования), использованная в данной работе, позволяет определить местоположение объекта на земной поверхности с точностью до нескольких миллиметров. Первоначально (в 80-х годах XX века) GPS развивалась как автономная спутниковая навигационная система. В основе ее применения лежит измерение расстояний от наземных станций до активных спутников, излучающих сигналы специальной формы. Эти расстояния определяются по времени прохождения излучаемого сигнала до наземного приемного устройства. Для определения координат в трехмерном пространстве теоретически достаточно получить расстояния до трех спутников, однако, учитывая погрешности часов, фактически необходимо наблюдать одновременно четыре спутника.

В настоящее время ядро системы представляет „созвездие“ из 24 спутников. Спутники системы GPS служат несущей платформой для установленного на них разнообразного оборудования, которое включает радиопередающие устройства, атомный стандарт частоты, компьютеры и т.д. в целях обеспечения возможности определения координат как на земной поверхности, так и в воздушном и околоземном пространстве. Каждый спутник генерирует сигнал специальной формы, несущий информацию, которая позволяет опознавать спутник и его положение в пространстве в произвольный момент времени.

В конце 80-х годов сотрудники многих геодинамических и геодезических организаций пришли к выводу об эффективности использования технологии GPS для научных исследований, таких как изучение землетрясений, движений в разломах земной коры и ее деформаций в целом, а также для ряда других приложений. Основной идеей организации Международной службы GPS (IGS) было создание глобального полигона, пункты которого расположены достаточно близко для взаимной привязки и при этом покрывают всю земную сушу. При такой конфигурации пункты глобального полигона реализуют геоцентрическую систему координат, что позволяет вычислять точные геоцентрические координаты исследуемых пунктов на основе прецизионных координат опорных пунктов за счет включения в совместную обработку одновременно измерений на пунктах исследуемых

полигонов и на опорных пунктах глобального полигона. Привязка местных и региональных исследуемых полигонов к опорным пунктам, реализующим геоцентрическую систему координат, лежала в основе проекта исследования деформации земной коры в глобальном масштабе.

До 1997 г. вся северная часть Евразии определялась пунктами GPS, расположенными лишь в ее европейской части. Это создавало значительные затруднения для геодезических измерений по всей территории ее восточносибирской и дальневосточной части и приводило к необоснованным выводам при геодинамическом анализе этих регионов. С 1997 г. на базе сейсмологических станций Геофизической службы (ГС) РАН нами была создана опорная сеть станций GPS [3] по всей территории северной Евразии — Деформационная сеть северной Евразии (North Eurasia Deformation Array — NEDA), охватывающая континент от Восточноевропейской платформы через Уральский хребет и всю Сибирь до Чукотки, Камчатки и Сахалина. В последнее время станции NEDA предоставляют базу для региональных проектов GPS, которые осуществлялись и совершенствовались с развитием NEDA в районах наибольшей сейсмической активности на границах взаимодействия трех крупнейших стабильных фрагментов земной коры: Евразийского (EUR), Североамериканского (NAM) и Тихоокеанского (PAC). В рамках региональных исследований нами были проведены [4,5] многолетние измерения в таких районах, как 1) слабоизученная граница Евразии и Северной Америки в районе хребта Черского; 2) субдуктивная зона сейсмической и вулканической активности на полуострове Камчатка; 3) зона сложной деформации и высокой сейсмической активности, связанной с конвергенцией Евразии и Северной Америки на острове Сахалин.

3. Методика измерений

С 1997 г. сеть NEDA обеспечила непрерывные измерения GPS на огромном пространстве северной Евразии. Все станции NEDA классифицированы службой IGS как глобальные станции, т.е. эти измерения обрабатываются ежедневно не менее чем тремя международными центрами. Передача суточных файлов измерений полностью автоматизирована, задержка не превышает 1 h. Сбор и передача первичной измерительной информации осуществляются с помощью компьютеров, подключенных к приемникам.

Файлы с измерениями передаются со станционных компьютеров на центральный сервер, установленный в ГС РАН.

Проанализированные данные передаются с центрального компьютера ГС РАН в глобальные центры данных Международной службы, где производится окончательная обработка данных по всему земному шару.

Результаты анализа данных и получаемые решения становятся доступными через Интернет в региональных центрах, в частности на центральном компьютере ГС РАН.

Схема передачи данных сети NEDA представлена на рис. 1.

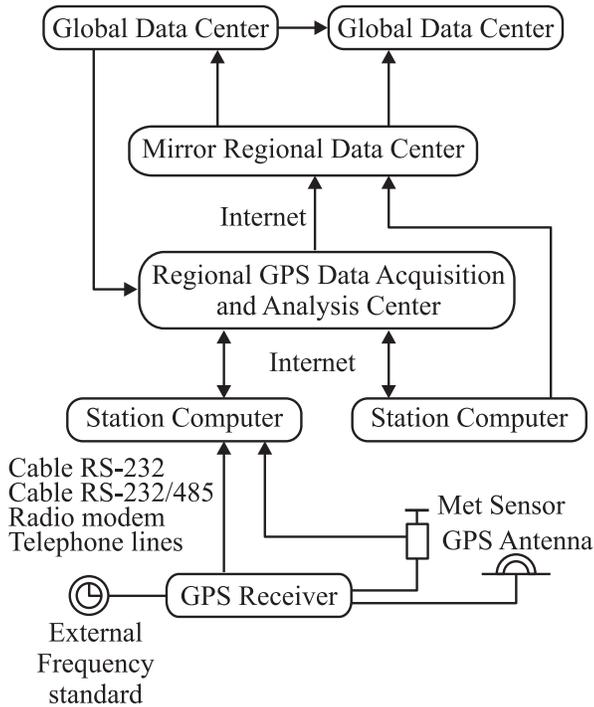


Рис. 1. Схема передачи данных сети NEDA.

Анализ многолетних временных рядов наблюдений по глобальному полигону, включая региональные сегменты, позволяет с достаточной определенностью получить поле взаимных скоростей отдельных точек на земной поверхности. При этом общая картина взаимных движений сегментов земной коры определяется полем горизонтальных скоростей, которые получаются проецированием взаимных скоростей этих пунктов на поверхность Земли. Наиболее важным аспектом анализа такого поля является возможность выделения стабильных недеформируемых фрагментов земной поверхности и оценки их взаимного движения. При этом также важно определить, насколько локализованы деформируемые пограничные области таких фрагментов, а именно: образуют ли границы фрагментов узкие деформационные пояса, или деформации простираются во внутренние области предполагаемых платформ, т.е. насколько оправданы существующие представления о стабильности древних платформ.

4. Результаты измерений

Анализ длинных временных рядов измерений позволил определить опорные станции, относящиеся к различным недеформируемым сегментам земной коры. Для

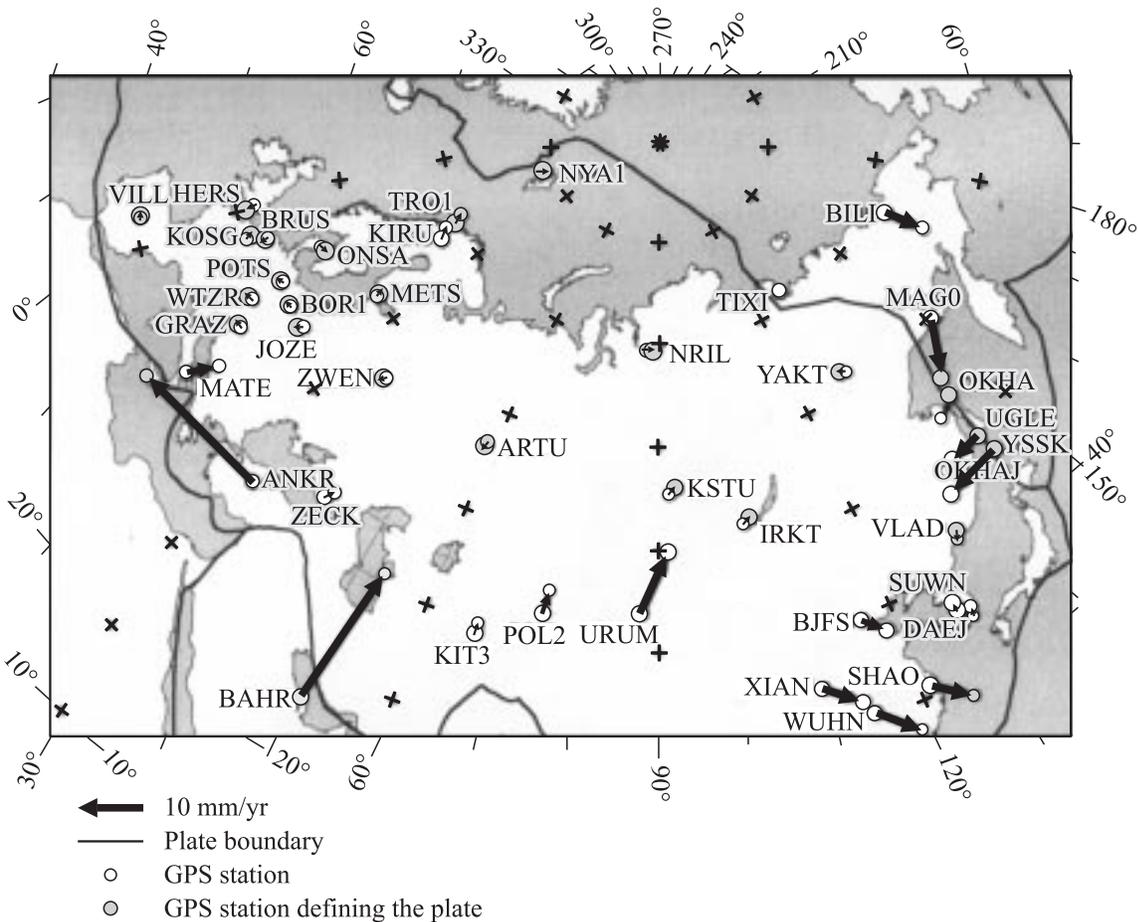


Рис. 2. GPS-станции, определяющие Евразийскую тектоническую плиту.

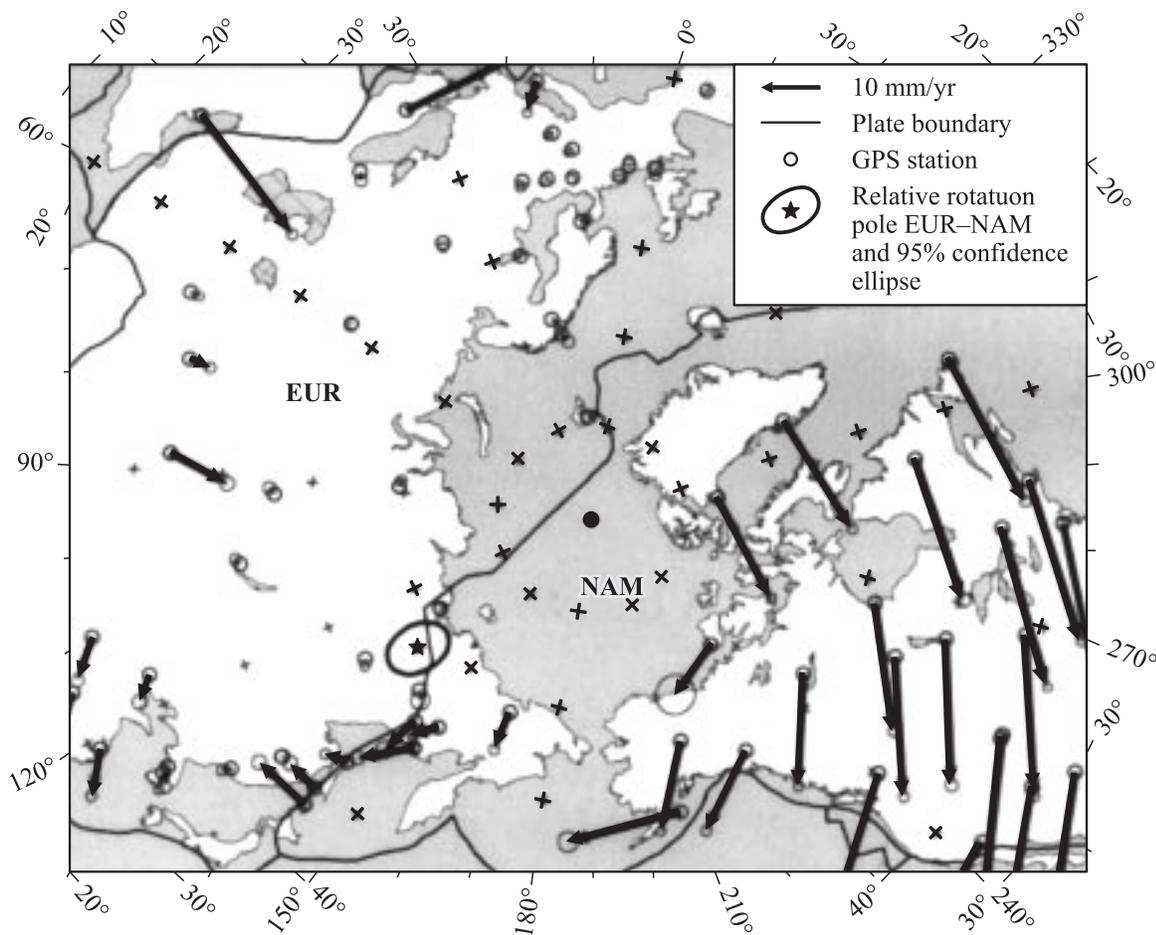


Рис. 3. Глобальное движение Североамериканской тектонической плиты (NAM) относительно Евразийской (EUR) по данным GPS.

примера на рис. 2 приведены стабильные станции Евразийской плиты. Следует отметить, что скорости взаимного движения опорных станций относительно одной плиты не превышают 0.5 mm/yr . Поэтому можно считать, что эти участки суши являются недеформируемыми сегментами земной коры.

Определение системы опорных станций дало возможность построить систему относимости, опирающуюся на три крупнейшие плиты: Евразийскую, Североамериканскую и Тихоокеанскую. Такая трехплитовая система относимости, в которую вошли в качестве ключевых элементов векторы взаимного вращения плит, послужила основой для геодинимического анализа их взаимодействия в трех упомянутых выше регионах.

Обоснованный выбор системы относимости позволил оценить местоположение полюса взаимного вращения Евразийской и Североамериканской плит. На рис. 3 он показан звездочкой. Анализ данных GPS выявил характер взаимного движения этих плит. Для примера на рис. 3 показано глобальное движение всей Североамериканской плиты относительно Евразии по часовой стрелке. Угловая скорость вращения составляет около 0.2° за

миллион лет. Относительно Северной Америки Евразия вращается против часовой стрелки. Изучение геометрии деформационной зоны [5–7] на границе плит стало возможным благодаря проведению детальных региональных измерений. Эти измерения осуществлялись с учетом местных условий: либо на постоянно установленных станциях региональных полигонов, либо на полевых пунктах периодического наблюдения с интервалом в один год.

Проведенные региональные измерения учитывались при комбинированном анализе следующих наборов данных: 1) полученных на постоянных станциях массива NEDA ГС РАН (с 1997 г.); 2) на постоянных станциях IGS в этом регионе; 3) данных периодических полевых измерений, выполняемых повторно с интервалом в один год (начиная с 1995 г.).

Для анализа кинематики тектонических плит в северо-восточной Азии сравним скорости относительно Евразии и относительно Северной Америки, полученные по данным GPS [5,8].

Относительно EUR (рис. 4, а) скорости составляют менее $2 \pm 1 \text{ mm/yr}$ для станций, которые расположены

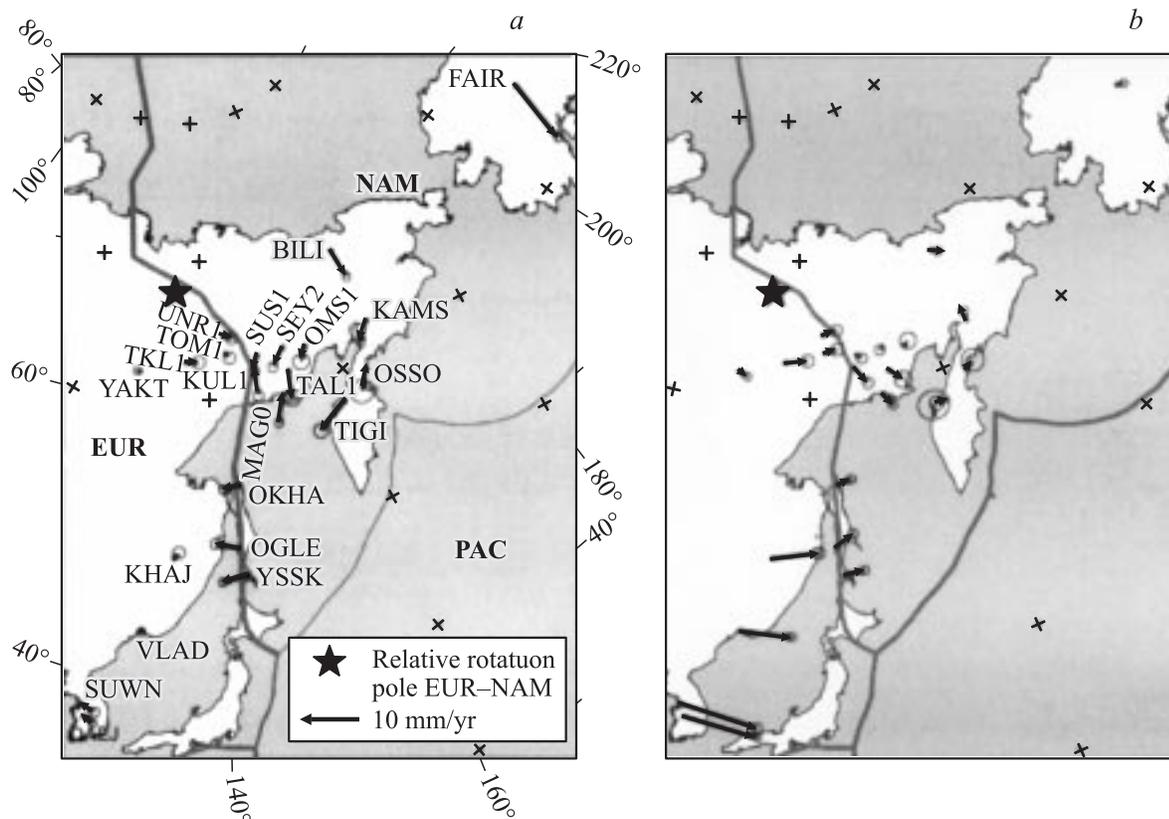


Рис. 4. Относительные скорости удаленных от зоны субдукции на Камчатке станций GPS в северо-восточной Азии. *a* — относительно Евразии, *b* — относительно Северной Америки.

западнее хребта Черского. Скорости станций на восточной стороне хребта Черского, Чукотке и северо-западной Камчатке значительно выше: 3–8 мм/год, что указывает на вращение данного региона относительно Евразии по часовой стрелке. Движение станций в районе хребта Черского свидетельствует о возможном влиянии распределенной деформации на границе взаимодействия EUR–NAM. Скорость конвергенции, однако, здесь мала вследствие близости полюса взаимного вращения, так что эффект накопления напряжений также достаточно мал и им можно пренебречь уже на расстоянии более 100 км от границы.

Скорости относительно Северной Америки (рис. 4, *b*) составляют менее 2 ± 1 мм/год на Чукотке и в северо-западной части Камчатки. Из шести станций на восточной стороне хребта Черского три самых северных (SUS1, SEY2 и OMS1) движутся медленнее (со скоростью 1 мм/год), в то время как три другие (MAG0, KUL1 и TAL1) движутся со скоростью 2–3 мм/год. Скорости на западной стороне хребта Черского составляют 2–11 мм/год, что указывает на вращение против часовой стрелки и соответствует вектору взаимного вращения EUR–NAM. Из сравнения скоростей следует, что западная ветвь сейсмического пояса хребта Черского является северо-восточной границей Евразии. Скорость станции TIXI (рис. 2) вблизи арктической границы Сиби-

ри относительно Евразии меньше, чем относительно Северной Америки; следовательно, сдвиг плит EUR–NAM в данном регионе происходит в основном к востоку от TIXI.

5. Обсуждение результатов

Прежде всего сформулируем основные экспериментальные результаты, полученные в данной работе.

Теоретически обоснован и реализован в масштабе северной Евразии многолетний эксперимент по созданию деформационной системы постоянных станций GPS, совмещенных с сейсмическими станциями РАН. Система полностью автоматизирована. Она позволяет решить ряд фундаментальных научных и практических задач: 1) улучшить качество определения орбит спутников GPS, что весьма существенно для высокоточной навигации в реальном времени; 2) создать базу для геодинамических исследований по всей территории северной Евразии, прежде всего в сейсмически активных областях, на основе наблюдательных региональных сетей.

Построена система относимости, опирающаяся на три крупнейшие плиты: Евразийскую, Североамериканскую и Тихоокеанскую. Определен полюс взаимного вращения Евразийской и Североамериканской плит. Выбранная

система относимости послужила основой для геодинамического анализа их взаимодействия в районе Дальнего Востока.

Отметим наиболее существенные результаты проведенного анализа.

1) Определены современные скорости взаимного движения плит и показано, что они существенно отличаются от скоростей геологической модели плит.

2) Впервые установлено, что западная ветвь сейсмического пояса хребта Черского является северо-восточной границей Евразии, а Чукотка и Камчатский полуостров составляют единое целое с Североамериканским континентом.

Попытаемся теперь осмыслить полученные результаты с позиций физической кинетики деформирования и разрушения твердых тел и рассмотрим возможность распространения представлений о закономерностях деформации твердых тел, обнаруженных для малых образцов в лабораторных условиях, на глобальные объекты в естественных условиях деформирования.

Основой для такого обсуждения являются представления о подобии ряда физических явлений на различных масштабных уровнях. Для процессов разрушения такое подобие экспериментально подтверждено [2]. Закономерности образования, накопления и развития трещин аналогичны для различных масштабных уровней. Концентрационный критерий перехода процесса разрушения с более низких иерархических уровней на более высокие наблюдается как для лабораторных образцов с начальными размерами трещин $\sim 10-100$ nm, так и для километровых трещин в земной коре, приводящих к землетрясениям. Эти вопросы детально обсуждаются в работах [9,10]. Хорошо известна также связь процессов разрушения и деформирования.

Самоподобие в структурном строении твердых тел прослеживается также в широком диапазоне масштабов от наноструктур до литосферных плит [1]. Мы полагаем, что кинетические представления универсальны для различных масштабных уровней и могут быть использованы для анализа движения континентальных плит. Поскольку в данных исследованиях измеряются непосредственно скорости движения, можно записать уравнение для кинетики деформации и оценить соответствующие параметры. К сожалению, непродолжительность этих измерений и малые скорости деформаций затрудняют такой анализ. Но высокая точность измерений свидетельствует о перспективности такого анализа.

Отметим, также перспективность моделирования движения плит в лабораторных условиях с подбором определенных материалов и условий нагружения, что позволит оценить действующие напряжения на границах движущихся плит и спрогнозировать последствия этих движений.

Список литературы

- [1] М.А. Садовский. ДАН СССР **4**, 829 (1979).
- [2] С.Н. Журков, В.С. Куксенко. Изв. АН СССР. Физика Земли **6**, 11 (1977).
- [3] M.G. Kogan, G.M. Steblov, R.W. King, T.A. Herring, D.I. Frolov, S.G. Egorov, V.Ye. Levin, A. Lerner-Lam, A. Jones. Geophys. Res. Lett. **27**, 14, 2041 (2000).
- [4] G.M. Steblov, M.G. Kogan, R.W. King, D.I. Frolov, S.A. Mironov, Yu.K. Rykhalsky. Suppl. EOS. AGU Fall Meeting Abstracts **79**, 45, 218 (1998).
- [5] G.M. Steblov, M.G. Kogan, R.W. King, C.H. Scholz, R. Bürgmann, D.I. Frolov. Geophys. Res. Lett. **30**, 18, 1924, doi: 10.1029/2003GL017805 (2003).
- [6] M.G. Kogan, A. Lerner-Lam, T. Koczyński, S.V. Gavrilov, O.N. Galaganov, D.I. Frolov, G.M. Steblov, R.W. King. Suppl. EOS. AGU Fall Meeting Abstracts **77**, 46, 149 (1996).
- [7] M.G. Kogan, R. Bürgmann, N.F. Vasilenko, C.H. Scholz, R.W. King, A.I. Ivashchenko, D.I. Frolov, G.M. Steblov, Ch.U. Kim, S.G. Egorov. Geophys. Res. Lett. **30**, 3, 1102, doi: 10.1029/2002GL016399 (2003).
- [8] M.G. Kogan, R.W. King, G.M. Steblov, A. Lerner-Lam, V.E. Levin. Suppl. EOS. AGU Fall Meeting Abstracts **79**, 45, 218 (1998).
- [9] В.С. Куксенко. ФТТ **47**, 5, 788 (2005).
- [10] А.В. Завьялов. ФТТ **47**, 6, 1000 (2005).

Публикация материалов Конференции завершена.