

И. Е. Дорогова¹✉

Моделирование и учет косейсмических и постсейсмических движений земной коры для координатного обеспечения государства

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ современных подходов к моделированию постсейсмических движений земной коры на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Предложена классификация моделей, включающая три типа: феноменологические (эмпирические), физические (пространственные) и гибридные (физически обоснованные функциональные). Рассмотрены основные тенденции развития методов за последние 20 лет. Сформулированы принципы выбора типа модели в зависимости от степени изученности физических параметров среды. На основе анализа сейсмической активности и текущей геофизической изученности территории Российской Федерации предложены рекомендации по выбору типов моделей постсейсмических движений земной коры для отдельных сейсмически активных регионов: Камчатки, Алтая, Байкала, Сахалина, Дальнего Востока, Кавказа и Крыма.

Ключевые слова: постсейсмические движения, ГНСС, косейсмические смещения, координатное обеспечение, модель движений земной коры, обратная задача геодинамики, афтерслайп, вязкоупругая релаксация

I. E. Dorogova¹✉

Modeling and accounting of co-seismic and post-seismic movements of the Earth's crust for the coordinate support of the state

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Abstract. The article presents an analysis of modern approaches to modeling post-seismic movements of the Earth's crust based on data from Global Navigation Satellite Systems (GNSS). A classification of models is proposed, including three types: phenomenological (empirical), physical (spatial), and hybrid (physically justified functional). The main trends in the development of methods over the past 20 years are considered. Principles for choosing the type of model depending on the degree of study of the physical parameters of the environment are formulated. Based on the analysis of seismic activity and the current geophysical study of the territory of the Russian Federation, recommendations are proposed for selecting types of models of post-seismic movements of the Earth's crust for certain seismically active regions: Kamchatka, Altai, Baikal, Sakhalin, the Far East, the Caucasus, and Crimea.

Keywords: postseismic movements, GNSS, coseismic displacements, coordinate support, model of crustal movements, inverse problem of geodynamics, afterslip, viscoelastic relaxation

Введение

Одной из главных задач координатного обеспечения государства является поддержание актуальности координат геодезических пунктов во времени. В сейсмически активных регионах эта задача существенно осложняется тем, что происходящие землетрясения вызывают не только скачкообразные косейсмические смещения, но и продолжительные постсейсмические движения (отклонения движений точек земной коры для участков, расположенных вблизи эпицентров землетрясений от свойственных им значений и направлений), которые могут сохраняться в течение многих лет после основного толчка [1, 2].

Как отмечено в работе [1], постсейсмические движения приводят к утрате актуальности координат геодезических пунктов и должны учитываться в модели движений земной коры в виде локальных подмоделей. При этом существующие международные модели, такие как ITRF2020, хотя и включают параметризацию постсейсмических деформаций [2], не могут в полной мере учесть региональную специфику отдельных сейсмически активных зон.

Целью настоящего исследования является анализ и систематизация существующих подходов к моделированию постсейсмических движений, классификация моделей и выбор оптимальной стратегии построения постсейсмических моделей для различных регионов Российской Федерации на основе анализа сейсмической и геофизической изученности территории.

Анализ и классификация существующих подходов к моделированию постсейсмических движений земной коры

Анализ литературы за последние 20 лет, включая работы, посвященные моделированию постсейсмических движений по данным ГНСС и InSAR, позволяет выделить три основных подхода, различающихся по степени учета физики процесса и по пространственной области применимости, на основании которых модели постсейсмических движений можно разделить на 3 типа: феноменологические (эмпирические) модели, физические (пространственные) модели, гибридные модели.

Феноменологические модели представляют собой наиболее простой подход. Временные ряды постсейсмических смещений земной коры в таких моделях аппроксимируются суммой математических функций, чаще всего – логарифмических и экспоненциальных [3, 4].

Общий вид эмпирических моделей может быть представлен следующим уравнением [4]:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \cdot \ln \left(1 + \frac{t - t_i^l}{\tau_i^l} \right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \cdot \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e}} \right) + C, \quad (12)$$

где A_i^l – амплитуда i -ой логарифмической составляющей (характеризует интенсивность афтерслайпа);

A_i^e – амплитуда i -ой экспоненциальной составляющей (характеризует интенсивность вязкоупругой релаксации);

t_i^e – эпоха землетрясения, соответствующая экспоненциальной составляющей;

t_i^l – эпоха землетрясения, соответствующая логарифмической составляющей;

τ_i^l – время затухания i -ой логарифмической составляющей;

τ_i^e – время релаксации i -ой экспоненциальной составляющей;

C – постоянное смещение (остаточная деформация).

Похожая модель применяется для учета постсейсмических движений земной коры в международной системе отсчета ITRF2020 [2].

Примерами успешной реализации такого подхода также являются модели, созданные для территории Японии после землетрясения Тохоку-Оки 2011 года [4], для Тайваня [3] и для Индонезии [5]. В работе [4] часть коэффициентов не является свободными (независимо эмпирически определяемыми для каждой отдельной станции), а принимаются в качестве универсальных постоянных для территории Японии, для описания косейсмических смещений в этой статье рекомендуется выбирать наиболее подходящую из трех предложенных моделей, которые отличаются набором коэффициентов.

Главное достоинство моделей этого типа – простота математических выражений, возможность быстрой фильтрации данных и вычислительная эффективность. Основным недостатком является то, что коэффициенты не имеют прямого физического смысла и являются чисто эмпирическими, в результате чего задача интерполяции между точками не имеет однозначного решения, так как параметры модели подбираются независимо для каждой станции.

Более корректным представляется подход к решению данной проблемы с геофизической точки зрения, при котором модель основывается на механике происходящих процессов. При таком подходе результаты ГНСС-наблюдений используют как один из источников информации для решения обратной задачи геодинамики – нахождения распределения дислокаций вдоль субдукционной поверхности по поверхностным смещениям, а также уточнения модели очага землетрясения по данным о постсейсмических смещениях. Пример решения такой задачи представлен в работе [6]. В этих моделях данные ГНСС-наблюдений используются как один из источников информации для восстановления параметров физических процессов, вызывающих постсейсмические движения.

В рамках физического подхода можно выделить три подтипа моделей:

– модели афтерслайпа: моделируют разрыв на разломе, который аппроксимируется сеткой прямоугольников, решается задача о распределении проскальзывания на глубине, объясняющем наблюдаемые поверхностные смещения;

– модели вязкоупругой релаксации: задается реологическая модель среды (Максвелла, Бюргерса) и вязкость мантии, после чего рассчитываются теоретические смещения, которые сравниваются с реальными данными ГНСС-наблюдений;

– комбинированные модели: учитывают одновременно оба процесса (афтерслаип и релаксацию) и позволяют разделить их вклад.

В последнее время более распространен третий подтип физических моделей, обычно такие математические модели основаны на дифференциальных уравнениях упругости и вязкоупругости с использованием функций Грина, Окада или Поллитца [6]. К их достоинствам стоит отнести непрерывность, модель описывает смещения не только в точках наблюдений, но и в любой точке пространства, наличие физического смысла параметров модели (вязкость мантии, параметры трения, изменения напряжений). Недостатками являются высокая вычислительная сложность и объем необходимой априорной информации о геометрии разлома и свойствах среды, а также вариативность выбора реологической модели.

В последние годы сформировался третий подход, который можно назвать гибридным или физически обоснованным функциональным [7, 8]. Эти модели внешне напоминают эмпирические (сумма затухающих функций), но их коэффициенты не являются свободными – они заранее вычисляются на основе физических параметров среды.

В работе [7] предложена модель:

$$D(t) = A \cdot f_{VR}(t) + A \cdot f_{AS}(t) + C,$$

где $f_{VR}(t)$ и $f_{AS}(t)$ – функции, выведенные из лабораторных законов физики горных пород, а коэффициенты A и B связаны с изменениями напряжений в мантии и на разломе соответственно.

$f_{VR}(t)$ – функция вязкоупругой релаксации основана на степенном законе ползучести (power-law creep) и реологии Бюргерса;

$f_{AS}(t)$ – функция афтерслаипа основана на законе трения с упрочнением на скорости (rate-strengthening friction).

Достоинством гибридных моделей является сочетание физической обоснованности параметров (возможность декомпозиции наблюдаемого движения на составляющие) и простота описывающих аналитических выражений. Главный недостаток – модели остаются одноточечными (не дают непрерывного описания косейсмических смещений)

На основе проведенного анализа предлагается классификация моделей постсейсмических движений земной коры, приведенная в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация моделей постсейсмических движений земной коры

Тип модели	Название	Основной принцип	Пространственная область	Физическая обоснованность
I	Феноменологические (эмпирические)	Кривая затухания описывается с помощью простых математических функций, без углубления в физику процесса. Обычно содержит логарифмические (связанные с афтерслайпом) и экспоненциальные составляющие (связанные с вязкоупругой релаксацией астеносферы)	Только точки наблюдений	Низкая
II	Физические (пространственные)	Основаны на восстановлении параметров физического процесса (вязкость мантии, параметры трения на разломе), который вызывает движения	Любая точка пространства (создает непрерывное поле решений)	Высокая
III	Гибридные (физически обоснованные функциональные)	Аналитические функции, выведенные из физических законов, с физическими параметрами, но не пространственные, а одноточечные (для точек наблюдений)	Только точки наблюдений	Средняя (параметры имеют физический смысл, применимы только в точках наблюдения)

Тенденции в моделировании постсейсмических движений земной коры и принципы выбора модели для конкретной территории

Анализ работ, посвященных изучению и моделированию постсейсмических движений земной коры, позволяет выделить несколько основных тенденций последних лет.

Эмпирические модели получили широкое распространение в 2000–2014 гг, в последние годы заметна тенденция к физическому обоснованию коэффициентов моделей. Работы [7, 8] демонстрируют примеры нового класса гибридных моделей, которые совмещают простоту аналитических выражений с физической интерпретируемостью параметров.

Важной тенденцией последних лет является также интеграция данных различных методов: ГНСС, InSAR и гравиметрических данных GRACE [8]. Это позволяет более надежно разделять вклады различных геодинамических процессов и уменьшать неоднозначность, присущую эмпирическим моделям. Наблюдается также переход от моделей описательного характера к прогнозным, моделирующим долгопериодные постсейсмические деформации.

На основе анализа основных типов моделей постсейсмических движений можно сформулировать основные принципы выбора типа модели для конкретной территории: создание физической (пространственной) модели целесообразно при наличии подробных исследований физических характеристик среды для изучаемой территории (известны физические параметры пород, геометрия сочленения литосферных плит, глубина очага и данные о напряжениях); если имеются некоторые исследования физических характеристик среды, известны отдельные физические параметры, но отсутствует полная информация для построения пространственной модели – рекомендуется создание гибридной модели; использование эмпирических моделей как первого приближения возможно на тех территориях, где имеются только данные ГНСС-наблюдений, а подробные геофизические исследования отсутствуют или фрагментарны.

На основе изложенных принципов и с учетом текущей сейсмической и геофизической изученности территории Российской Федерации для моделирования постсейсмических деформаций для различных регионов предлагается выбор следующих типов моделей: Камчатка – физическая модель (регион характеризуется высокой сейсмической активностью, наличием подробных геофизических исследований), Алтай, Байкал, Сахалин, Дальний Восток – гибридные модели (имеются отдельные геофизические исследования, но не достаточно подробные для построения полноценной пространственной модели); Кавказ, Крым – эмпирические модели (имеются данные ГНСС-наблюдений, позволяющие построить эмпирические зависимости).

Заключение

В результате проведенного исследования проанализированы существующие подходы к моделированию постсейсмических движений земной коры, предложена трехуровневая классификация моделей постсейсмических движений, учитывающая как степень учета физики процесса, так и возможность пространственной экстраполяции: феноменологические (эмпирические), основанные на подборе коэффициентов логарифмических и экспоненциальных функций; физические (пространственные), решающие обратную задачу геодинамики; гибридные, сочетающие физическую обоснованность с аналитической простотой.

Также в работе сформулированы принципы выбора типа модели в зависимости от степени изученности физических параметров среды и доступности геофизических данных, и на основе анализа текущего состояния геофизической изученности территории Российской Федерации предложены типы моделей для отдельных регионов.

Описанные локальные подмодели постсейсмических движений для выбранных регионов планируется разработать и включить в состав модели движений земной коры для координатного обеспечения территории Российской Федерации [1].

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ» с целью повышения точности координатно-временных определений на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорогова И.Е., Демидов К.А. Реализация первого приближения программно-математической модели движений земной коры для пересчета координат пунктов между эпохами // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 2. – № 1. – С. 19-25. – DOI: 10.33764/2618-981X-2025-1-2-19-25.
2. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., Métivier L., Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. – 2023. – Vol. 97, No. 5. – DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
3. Chen K.-H., Yang W.-B., Hsu Y.-J., Lee S.-B. Realization approach of non-linear postseismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame // Earth, Planets and Space. – 2020. – Vol. 72, No. 36. – DOI: 10.1186/s40623-020-01209-y.
4. Tobita M. Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake // Earth, Planets and Space. – 2016. – Vol. 68, No. 41. – DOI: 10.1186/s40623-016-0422-4.
5. Abidin H.Z., Meilano I., Sarsito D.A., et al. Semi-Dynamic Datum of Indonesia // FIG/IAG/UN-GGIM-AP/ICG/GSI/JFS Technical Seminar Reference Frame in Practice. – Kobe, Japan, 2017.
6. Владимирова И.С., Лобковский Л.И., Михайлов В.О. Моделирование постсейсмических процессов в зонах субдукции // Геодинамика и тектонофизика. – 2012. – Т. 3, № 2. – С. 131-151. – DOI: 10.5800/GT-2012-3-2-0068.
7. Dhar S., Muto J. Function Model Based on Nonlinear Transient Rheology of Rocks: An Analysis of Decadal GNSS Time Series After the 2011 Tohoku-oki Earthquake // Geophysical Research Letters. – 2023. – Vol. 50, e2023GL103259. – DOI: 10.1029/2023GL103259.
8. Yamashita T., Dhar S., Muto J. Application of a physics-based function model to postseismic GNSS time series after the 2010 Maule, Chile earthquake // JpGU Meeting 2025. – Chiba, Japan, 2025.

© И. Е. Дорогова, 2026