

УДК 004.942:528.2/.3

## МНОГОДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА; П.С. ДОЛГИЙ  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматривается проблема моделирования геодинамических процессов, требующая для решения комплексного подхода не только различных наук о Земле, но и учета космических влияний, например, солнечной активности или взаимодействия планеты Земля с другими планетами солнечной системы через физические поля, знаний фундаментальных физико-математических наук и геоинформационных технологий. Приведены известные геодинамические модели, используемые при исследовании современных движений земной коры, и перспективы их развития в связи с появлением современных технологий в геодезии и ГИС. Показаны новые результаты по моделированию вертикальных деформаций земной коры в Полоцком регионе, заключающиеся в автоматизации процесса моделирования с помощью составления программного обеспечения «Моделирование СВДЗК» и ГИС-проекта «Геодинамика Полоцкого региона».*

**Ключевые слова:** современные движения земной коры, моделирование, междисциплинарный подход, повторные геодезические измерения, программирование, геоинформационные системы.

Как известно [1; 2], актуальными проблемами наук о Земле (геологии, геофизики, геоморфологии, океанологии, геодезии, сейсмологии и др.) являются проблемы «Геодинамика» и «Современные движения земной коры» (СДЗК). Однако исторически ученые раньше занялись проблемой СДЗК, чем первой проблемой, хотя «Геодинамика» представляет собой более высокий уровень, так как включает в себя исследование динамических процессов, происходящих в системе «Земля» (физическое тело Земли вместе с ее внешними газообразными оболочками) и проявляющихся в этих процессах физических полей, а проблема СДЗК, изучающая динамические процессы только самого верхнего слоя Земли, является лишь составной частью геодинамики. Исследование геодинамических процессов требует комплексного подхода не только различных наук о Земле, но и учета космических влияний, например, солнечной активности или взаимодействия планеты Земля с другими планетами солнечной системы через физические поля. В то же время занимающаяся исследованиями этих процессов геодинамика как научная дисциплина, если даже начинать счет с изучения СДЗК, появилась сравнительно недавно, примерно с середины XX столетия, когда представители различных наук о Земле уже ясно понимали необходимость комплексного подхода. Однако сложность проблемы и недостаток экспериментального материала привели к тому, что на первоначальном этапе накопления экспериментальных данных исследователи всех указанных наук нашли свою нишу в изучении геодинамических процессов и действовали, по сути, отдельно друг от друга: геодезисты получали количественные характеристики деформаций земной коры; геофизики – вариации гравитационного и магнитного полей Земли; сейсмологи – информацию о сейсмичности и напряжениях в недрах нашей планеты и т.д. Однако каждый из исследователей, интерпретируя свои результаты, неизбежно сталкивался с тем, что многогранность проявления геодинамических процессов обусловлена их сложным единством, взаимосвязанностью геофизических полей не только между собой, но и с деформациями земной коры, сейсмичностью, глубинными геолого-тектоническими явлениями в недрах Земли, активностью Солнца, климатическими изменениями, то есть с необходимостью соединить на этапе интерпретации результаты геодинамических исследований различных наук о Земле и Вселенной.

К концу прошлого столетия во многих странах мира, включая и Беларусь, накопился значительный объем разнородных данных геодинамических исследований: геодезических, геолого-геофизических, сейсмологических, гидрологических, метеорологических и т.д., что позволило приступить к установлению возможных закономерностей проявления геодинамических процессов: их математическому моделированию, проверке существующих геологических моделей или созданию новых.

В науках о Земле было сделано такое важное теоретическое открытие [3; 4], как установление блочно-иерархической структуры земных недр, когда горные массивы и земная кора в целом делятся на макро-, мезо- и микроблоки, геодинамические процессы в которых, выражающиеся, например, в деформациях, протекают непрерывно, но с различной скоростью: в макро – медленнее, в мезо и микро – быстрее. Это открытие стало активно использоваться в геомеханике и геодинамике [5].

Известные геодинамические модели (модель тектоники плит; карта скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) [6] как линейная модель площадного распространения этих скоростей; модели развития СВДЗК, основанные на алгоритме Христового [7]; модель кусочно-однородного деформирования земной поверхности [8], базирующаяся на теории упругости) неодинаковы по сложности с точки зрения математического моделирования и получены на основе эксперимен-

тальных данных, но при определенных теоретических допущениях. На наш взгляд, наиболее сложной из перечисленных является модель тектоники плит, которая и сформирована на основании большого числа различных классов данных, а для проверки и объяснения требует не только результатов исследований со стороны наук о Земле, но и привлечения знаний ряда фундаментальных наук, прежде всего физики (особенно раздела тепловой конвекции) и математики.

Современные информационные и инструментальные возможности, получение новых экспериментальных данных позволяют проверить существующие модели, предложить алгоритмы к их усовершенствованию, а также разработать наиболее наглядные формы представления с применением технологий и программного обеспечения ГИС.

Так, в результате внедрения в геодезическую практику спутниковых технологий оказалось возможным существенно расширить площадной охват участков Земли для организации на них геодинимического мониторинга за деформациями земной коры. Спутниковыми методами создана IGS (International GNSS Service) сеть с постоянно работающими базовыми станциями, расположенными по всему миру, а значит и на различных тектонических плитах. Сеть IGS призвана предоставлять данные высокого качества как стандарта GNSS (Global Navigation Satellite Systems) с целью поддержки научных исследований в области изучения Земли; охватывает в режиме мониторинга практически всю территорию земного шара, данные которого не только подтвердили гипотезу тектоники плит, но и позволили приступить к созданию динамической модели этой тектонической гипотезы в пространственно-временном аспекте (рисунок 1).

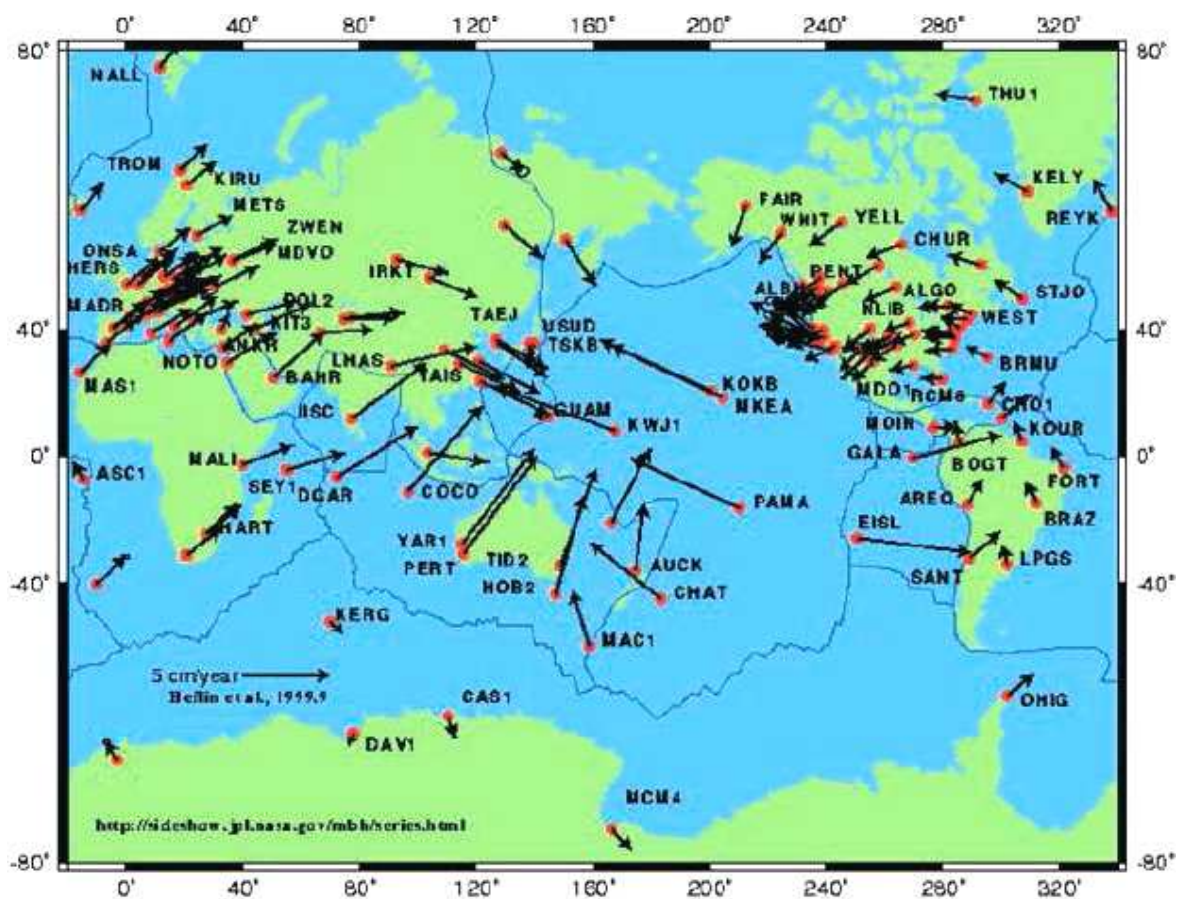


Рисунок 1. – Движения литосферных плит по данным сервисной службы IGS

● – пункты IGS сети; —> – векторы горизонтальных смещений

Появилась возможность проверки результатов геодинимических исследований одной науки аналогичными данными другой науки. Так, рассчитанные по сейсмограммам сеймотектонические деформации с определением компонентов деформации в соответствии с теорией упругости (направление главных осей напряжений или деформаций, сдвиг, дилатация) для участков земной коры, подверженных воздействию землетрясения, оказалось возможным сопоставить с аналогичными характеристиками деформаций земной коры, найденными по результатам геодезических измерений согласно [8; 9].

Такое сравнение представлено в научной работе [10], в которой по данным сейсмической сети KNET за 1994–2006 годы проведен расчет сейсмотектонических деформаций земной коры Северного Тянь Шаня (скорости дилатации и скорости деформации сдвига), которые сопоставлены с одноименными деформационными характеристиками, найденными её авторами по результатам геодезических спутниковых GNSS-наблюдений. Аналогичные данные для территории Монголии приведены в [11].

В работе [12] выполнен анализ модели взаимодействия Евразийской и Тихоокеанской тектонических плит по трем видам экспериментальных данных: 1) результатам наземных линейно-угловых измерений на Карымском, Петропавловск-Камчатском и Шипунском геодинамических полигонах (ГДП) полуострова Камчатка, расположенном на стыке двух плит (рисунок 2); 2) палеомагнитным данным; 3) результатам космических измерений. Сделан вывод, что все три вида экспериментальных данных свидетельствуют в пользу гипотезы тектоники плит и непрерывного расширения океанического дна.

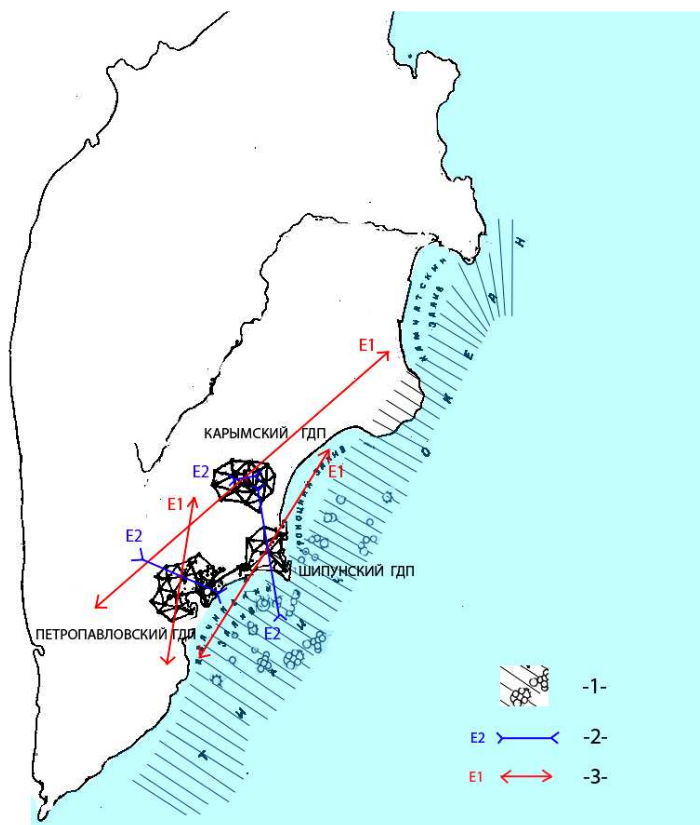


Рисунок 2. – Схема расположения ГДП на восточном побережье полуострова Камчатка

- 1 – сейсмофокальная зона (стык океанической Тихоокеанской и континентальной Евразийской плит);
- 2, 3 – направления минимального E2 и максимального E1 растяжений

Приведенные примеры показывают, что геодинамика как наука стремительно развивается. Моделирование геодинамических процессов выполняется повсеместно, хотя это достаточно сложная проблема, так как речь идет о моделировании физических явлений, обычно приводящих к решению некорректных математических задач. Ее направления обозначены в трудах ряда известных ученых [1; 2; 13], однако окончательное решение требует дальнейших исследований.

Общим положительным моментом этого стремительного развития, на наш взгляд, является единство мнений ученых о необходимости междисциплинарного и многодисциплинарного подхода при исследовании геодинамических процессов, даже если речь идет только о СДЗК или о деформациях земной поверхности. Необходимо не только продолжить накопление экспериментальных данных о проявлении глобальных, региональных и локальных геодинамических процессов, но и устанавливать закономерности их развития как во времени, так и в пространстве.

В экспериментальной части представляемой работы продолжено исследование пространственно-временных моделей деформаций земной коры на локальном участке Полоцко-Курземского пояса тектонических разломов, составленных по 10-ти циклам высокоточного нивелирования, выполненного с 2004 по 2015 год [14–16]. При этом модель развития вертикальных деформаций в пространстве взята

в виде тригонометрического ряда Фурье с заданным периодом (формула (1)), а во времени – в виде степенного ряда (формулы (2)–(4)).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{\pi x_i}{l} + b_1 \sin \frac{\pi x_i}{l} + a_2 \cos \frac{2\pi x_i}{l} + b_2 \sin \frac{2\pi x_i}{l}, \quad (1)$$

где  $l$  – период.

Для определения неизвестных коэффициентов  $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2$  в формуле (1) задавались экспериментальные данные в виде средних скоростей вертикальных движений нивелирных знаков по профилю, выраженных в мм/год, за период 2004–2015 годов.

Развитие вертикальных деформаций во времени исследовалось на 3-х моделях, таких как:

1) линейная аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k(T_i - T_0); \quad (2)$$

2) квадратичная аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k(T_i - T_0) + A_k(T_i - T_0)^2; \quad (3)$$

3) кубическая аппроксимация

$$H_k^i = H_k^0 + V_k(T_i - T_0) + A_k(T_i - T_0)^2 + B_k(T_i - T_0)^3. \quad (4)$$

В уравнениях (2)–(4)  $V_k, A_k, B_k$  – коэффициенты аппроксимирующих уравнений;  $k$  – номер репера;  $T_i$  – эпохи нивелирования (2004 г.; 2006–2013 гг.; 2015 г.);  $T_0$  – начальная эпоха (2003 г.), к которой приводятся результаты нивелирования.

Для оценки точности моделей вычислена средняя квадратическая ошибка  $m$  по формуле Гаусса, так как измеренная отметка репера в данном случае принята за ее истинное значение:

$$m_{\text{модели}} = \sqrt{\frac{(H_k^{\text{выч.}} - H_k^{\text{изм.}})^2}{N}}, \quad (5)$$

где  $N$  – общее число разностей ( $N = 70$ ).

Для реализации алгоритма моделирования современных вертикальных движений земной коры создано удобное программное обеспечение на языке PYTHON, блок-схема которого представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. – Блок-схема ПО «Моделирование СВДЗК»

Для наглядного представления результатов моделирования СВДЗК составлен ГИС-проект «Гео-динамика» на Полоцкий регион в среде ARCGIS, исходными данными для которого послужили геодези-

ческие, геофизические, сейсмологические и геологические данные, включая и результаты обработки 10-ти циклов нивелирования на Полоцком геодинамическом профиле [14] в ПО «Моделирование СВДЗК».

На основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- полученные результаты найдут применение для анализа и прогноза проявления геодинамических процессов и будут полезны при оценке взаимообусловленных влияний тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры и экологию окружающей среды;

- намеченный в мире многодисциплинарный подход к моделированию геодинамических процессов свидетельствует о многогранности и зрелости науки «Геодинамика».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Панкрушин, В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем / В.К. Панкрушин. – Новосибирск : СГГА, 2002. – 424 с.
2. Мазуров, Б.Т. Моделирование геодезических и гравитационных параметров при изучении геодинамических процессов / Б.Т. Мазуров. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 242 с.
3. О свойстве дискретности горных пород / М.А. Садовский [и др.] // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 12.
4. Садовский, М.А. Дискретные иерархические модели геофизической среды / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко // Комплексные исследования по физике Земли. – М. : Наука, 1989. – С. 68–87.
5. Ци Чэнчжи, Ван Минян, Цянь Циху, Чень Цзяньцзе // Физическая мезомеханика. – 2006. – 96). – С. 29–36.
6. Карта современных вертикальных движений земной коры СССР. – М. : ГУГК СССР, 1988.
7. Hristov, W.K. Gemeinsame Ausgleichung von Hohen und Vertikalgeschwindigkeiten eines Nivellierungsnetzes / W.K. Hristov. – Acta Geodaet., Geophys. Et Montanist., Acad. Sci. Hung. Tomus 9(1–2), h. 147–151, 1974.
8. Есиков, Н.П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности / Н.П. Есиков. – М. : Наука, 1979. – 152 с.
9. Изучение полей деформации земной коры методом конечных элементов / В.А. Шульман [и др.] // Геодезия и картография. – 1979. – № 5. – С. 13–19.
10. Деформации земной коры по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костик [и др.] // Физика Земли. – 2010. – № 3. – С. 52–65.
11. Механизмы очагов землетрясений и поле напряжений Монголии и прилегающих территорий / Н.А. Радзиминович [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – № 7 (1). – С. 23–38.
12. Коровкин, В.Н. Анализ гипотезы тектоники плит по результатам геодезических измерений и данных других наук о Земле / В.Н. Коровкин, Г.А. Шароглазова, В.А. Парфененко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2009. – № 9. – С. 109–115.
13. Кафтан, В.И. Временной анализ геопространственных данных: кинематические модели : дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Кафтан. – М., 2003. – 284 л.
14. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе : отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т ; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2013. – 83 с. – № ГБ 0314.
15. Применение метода Христового к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 99–105.
16. Коровкин, В.Н. Математическое моделирование геодинамических процессов / В.Н. Коровкин, А.Н. Соловьев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 16. – С. 117–122.

Поступила 07.06.2018

#### MULTIDISCIPLINARY APPROACH TO THE MODELING OF GEODYNAMIC PROCESSES

G. SHAROGLAZOVA, P. DOLHI

*The article is devoted to the problem of modeling of geodynamic processes, which solution requires a comprehensive approach not only different earth sciences, but also taking into account the cosmic influences, such as solar activity or the interaction of our planet with other planets of the solar system through physical fields, knowledge of fundamental physical and mathematical sciences and geoinformational technologies. The known geodynamic models used in the study of recent crustal movements, and the prospects for their development in conjunction with the advent of modern technologies in geodesy and GIS are presented. New results of modeling of the vertical deformations of the crust in the Polotsk region, namely, to automate the modeling process by using the development “Modeling of RVCМ” software and GIS-project “Geodynamics of Polotsk region” are shown.*

**Keywords:** recent crustal movements, modeling, multidisciplinary approach, repeated geodetic measurements, programming, geoinformational system.