

На правах рукописи



Маркович  
Кирилл Игоревич

**Совершенствование геодезических методов мониторинга  
геодинамических процессов с привлечением глобальных моделей  
Земли и обеспечением многодисциплинарного подхода**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Шароглазова Галина Александровна**

Официальные оппоненты: **Стеблов Григорий Михайлович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГБУН Институт физики Земли  
им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН),  
лаборатория спутниковых методов изучения  
геофизических процессов, главный научный  
сотрудник.

**Мустафин Мурат Газизович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ «Санкт-Петербургский горный  
университет», кафедра инженерной  
геодезии, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Пермский государственный  
национальный исследовательский  
университет» (ПГНИУ)

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_-\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном  
университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва,  
Гороховский пер., 4, Зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного университета геодезии и картографии и на сайте  
<http://www.miiгаik.ru/science/councils/dissertation/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования. Степень разработанности.**

Актуальность темы диссертационного исследования заключается в необходимости обеспечения на всех этапах изучения геодинамических процессов многодисциплинарного подхода различных наук о Земле: геодезии, геофизики, геологии, сейсмологии и т.д. Это обусловлено многогранностью проявления данных процессов из-за их сложного единства через взаимосвязанность геофизических полей не только между собой, но и с деформациями земной коры, сейсмичностью, глубинными геолого-тектоническими явлениями в недрах Земли, активностью Солнца, климатическими изменениями. Обеспечение комплексного подхода различных специалистов на всех этапах наблюдения за современными движениями земной коры (СДЗК) для геодезистов особенно важно, так как в спокойный тектонический период количественные характеристики этих движений малы и фактически соизмеримы с точностью геодезических измерений. Выбор схемы геодезического построения, мест закладки центров, их типов требуют участия геологов, геофизиков и сейсмологов уже на этапе проектирования. Привлечение к геодинамическим исследованиям современных методов космической геодезии и геоинформационных технологий активно способствует сближению представителей различных наук о Земле и обеспечению многодисциплинарного подхода к исследованиям геодинамических процессов.

Большой вклад в решение задачи изучения СДЗК России и Беларуси в 70-80-е годы прошлого столетия сделали организации Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) СССР, благодаря которым появился значительный объем данных повторного нивелирования и составлена карта скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) СССР [Гл. редактор Кашин Л.А., 1989], а также следующие ученые: Ю.Д. Буланже, М.Д. Герасименко, Н.П. Есиков, Г.И. Каратаев, В.И. Кафтан, В.К. Кучай, Б.Т. Мазуров, А.С. Махнач, Г.А. Мещеряков, О.М. Остач, А.К. Певнев, А.А. Святогоров, Л.И. Серебрякова, В.А. Сидоров, В.Е. Хаин и др.

Однако при построении этой карты использовалась модель линейного

интерполирования скоростей СВДЗК, практически не учитывающая тектонического строения земной коры и данных других наук о Земле.

Примерно в те же годы при составлении карт СВДЗК стал использоваться [В.А. Скрыль, Г.А. Мещеряков, 1982; Е. Kanpiescr, 1983; А.Г. Лисовец, А.А. Никонов, В.А. Скрыль, 1986] метод средней квадратической коллокации [Н. Moritz, 1973-1978]. Главным препятствием к его широкому применению при картировании СВДЗК явились сложности с представлением автоковариационной функции прогнозируемого процесса [В.С. Губанов, 1997].

Поиск решения проблемы прогнозирования скоростей СВДЗК способствовал привлечению и других методов: рекуррентный прогноз, модели авторегрессии и скользящего среднего, сингулярно-спектральное разложение. Однако все перечисленные методы математического моделирования не учитывали комплексной природы геодинамических процессов, сопровождающейся деформациями земной коры, изменением геофизических полей, корреляцией с рельефом и внутренним строением Земли. Максимально условию комплексности в плане установления эмпирических связей между СВДЗК и геолого-геофизическими данными, на наш взгляд, удовлетворяет подход профессора Г.И. Каратаева [П.П. Колмогорова, Г.И. Каратаев, 1975], предложенный в 70-х годах XX столетия и связанный с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям.

Значительный объем инструментальных исследований современной геодинамики Беларуси приходится на 70 -80-е годы. По инициативе Академии наук Республики в это время был организован Белорусский геодинамический полигон, на котором в режиме мониторинга проводились гравиметрические, магнитометрические, сейсмологические и геодезические наблюдения [Р.Г. Гарецкий, Г.И. Каратаев, 2015]. В этот же временной период выполнены исследования современной геодинамики территории Припятского прогиба [А.К. Карабанов, 2009], входящего в Белорусский геодинамический полигон, в которых участвовали геодезисты ГУГК, а также геофизики, сейсмологи и геохимики Академии Наук Беларуси. Несмотря на значительный объем данных инструментальных исследований различных наук о

Земле, в подавляющем большинстве случаев они интерпретировались отдельно друг от друга [А.К. Карабанов, 2007, 2011; Р.Г. Гарецкий, Г.И. Каратаев, 2015], что не способствовало повышению достоверности общей картины современного геодинамического режима Беларуси. Подобная ситуация характерна для всей территории бывшего СССР.

В настоящее время возможности проведения инструментальных геодинамических исследований существенно повысились, так как появились новые средства измерений, открытые информационные ресурсы, программное обеспечение. Поэтому представляется чрезвычайно важным совершенствование геодезических методов мониторинга геодинамических процессов путем привлечения моделей гравитационного поля и рельефа Земли, данных различных наук о Земле и новейшего программного обеспечения к проблеме изучения СДЗК.

**Целью диссертационной работы является** совершенствование геодезических методов мониторинга геодинамических процессов с привлечением глобальных моделей Земли и обеспечением междисциплинарного подхода (на примере Республики Беларусь).

**Задачи диссертационной работы:**

- Разработка алгоритма построения карт скоростей СВДЗК по совместному набору данных различных наук о Земле с привлечением глобальных моделей гравитационного поля и рельефа Земли.

- Разработка методики мониторинга СДЗК по результатам ГНСС-измерений с обеспечением междисциплинарного подхода различных наук о Земле.

- Разработка алгоритма прогнозирования неприливных вариаций ускорения силы тяжести на территориях, слабо обеспеченных повторными гравиметрическими измерениями.

- Анализ влияния вариаций гравитационного поля (ВГП) на параметры вертикальных деформаций земной коры в условиях равнинных и спокойных в геологическом отношении территорий (на примере Республики Беларусь).

**Научная новизна** результатов исследования заключается в следующем:

- Разработанный алгоритм построения карт скоростей СВДЗК основан на новом принципе прогнозирования по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

- Разработанный алгоритм прогноза неприливных вариаций ускорения силы тяжести обосновывает возможность использования модели скоростей СВДЗК и корреляционной модели прогноза для повышения точности создания карт неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

- Доказано, что вариации гравитационного поля во времени необходимо учитывать при выполнении повторного геометрического нивелирования на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях.

### **Теоретическая значимость работы:**

Результаты использования представленной методики мониторинга СДЗК с обеспечением междисциплинарного подхода различных наук о Земле способствуют повышению общетеоретического уровня современных исследований деформаций земной поверхности геодезическими методами. Алгоритм построения карт скоростей СВДЗК и неприливных вариаций ускорения силы тяжести расширяют представления о природе пространственного изменения СВДЗК и неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что разработанный алгоритм прогнозирования скоростей СВДЗК и неприливных вариаций ускорения силы тяжести позволяют повысить достоверность существующих карт скоростей СВДЗК и неприливных вариаций ускорения силы тяжести, широко используемых специалистами в области геодинамики и геодезической гравиметрии. Представленная методика мониторинга СДЗК по данным ГНСС-измерений с обеспечением междисциплинарного подхода может быть использована для выявления изменений во времени напряженно-деформированного состояния земной поверхности с целью оценки риска возникновения землетрясений.

**Методы и методология диссертационного исследования** основаны на эмпирических методах научного познания. Методы, применяемые в работе, – аналитический, системный анализ, измерение, моделирование, сравнение.

**Новые научные результаты и положения, выносимые на защиту:**

- Разработан алгоритм построения карт скоростей СВДЗК с использованием корреляционной модели прогноза скоростей СВДЗК по совместному набору геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

- Разработана и апробирована методика мониторинга СДЗК по результатам ГНСС-измерений, основанная на идее междисциплинарного подхода различных наук о Земле и позволяющая получать наиболее точные характеристики деформаций земной поверхности на геодинамических полигонах, включая и территории взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов.

- Разработан алгоритм прогноза неприливных вариаций ускорения силы тяжести по модели скоростей СВДЗК и корреляционной модели прогноза.

- Обоснована необходимость учета влияния вариаций гравитационного поля на результаты геометрического нивелирования, проложенного на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях.

**Достоверность результатов проведенных исследований, обоснованность выводов и рекомендаций.** Полученные в работе научные результаты являются обоснованными, что обеспечивается использованием строгих классических методов и принципов математической статистики, математического анализа, проведением компьютерных экспериментов. Достоверность результатов подтверждается непротиворечивостью данных компьютерного моделирования с обработанными данными, полученными в ходе экспериментов, апробацией на конференциях, публикациями в рецензируемых научных журналах.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.**

Результаты исследований доложены на четырех конференциях (международных, региональных), в том числе: Научно-технической конференции «Инновационные технологии в геодезии и картографии» 25-26 мая 2018 года, Белорусский национальный технический университет, Минск; Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития» 27-29 мая 2019 года, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва; Международной

научно-практическая конференция «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» 21-22 ноября 2019 года, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь; Международной научно-технической онлайн конференции «Пространственные данные в условиях цифровой трансформации» 25-27 мая 2020 года, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва.

Результаты исследований внедрены в производственный и учебный процесс шести организаций.

### **Основное содержание диссертационной работы**

Во **введении** представлена актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, а также теоретическая и практическая значимость. Обоснована научная новизна и достоверность полученных результатов. Изложены методология исследования и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дано понятие современных движений земной коры, их природа и классификация. Рассмотрена история и современное состояние методов изучения современных движений земной коры. Показано, что выводы о количественных характеристиках региональных СДЗК территории Республики Беларусь сделаны по результатам высокоточного повторного геометрического нивелирования, и эта тенденция пока сохраняется. Отмечено, что наиболее высокая точность, достоверность и детальность определения деформаций земной коры возможна сегодня лишь при создании локальных геодинамических полигонов с обеспечением междисциплинарного подхода. Основным геодезическим методом геодинамического мониторинга как территорий стран постсоветского пространства, так и зарубежных, являются ГНСС-измерения в сочетании с геометрическим нивелированием.

**Во второй главе** представлен алгоритм построения карты скоростей СВДЗК с использованием корреляционной модели прогноза скоростей СВДЗК по



совместному набору геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных на примере территории Республики Беларусь.

Теоретической основой прогнозирования скоростей СВДЗК явилась методика профессора Г.И. Каратаева, связанная с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям. Суть предложенной концепции состоит в следующем:

Исследуемая область разбивается на эталонную  $R^Э$  (совокупность точек с заданными значениями скоростей СВДЗК  $V^Э$ ) и прогнозную  $R^K$  (совокупность точек, в которых требуется найти возможные значения скоростей СВДЗК  $V^K$ ) области. На всей исследуемой области задаются геодезические, геолого-геофизические и сейсмологические данные  $g_I$ , по которым предполагается прогноз  $V^K$ . Постулируются следующие положения:

1) Если коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  формул связи (1) между скоростями и геодезическими, геолого-геофизическими и сейсмологическими данными двух различных областей найдены и применение коэффициента  $A_2$  в первой области, а  $A_1$  во второй дает значения скоростей, близкие к заданным, то коэффициенты считаются совпадающими, т.е. выполняется условие:

$$V_1 - A_2 g_1 \leq \varepsilon_0, \quad V_2 - A_1 g_2 \leq \varepsilon_0 \quad (1)$$

где  $A_I g_I$  – операция прогнозирования,  $\varepsilon_0$  – точность прогнозирования.

2) Задается система правил классификаций изучаемой территории со все увеличивающимся числом классов ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_\varphi$ ) по геолого-геофизическим признакам (правила разбиения территории).

На основании этих постулатов строится схема прогноза. Необходимым условием является нахождение коэффициентов связи  $A_I$  между  $V^Э$  и  $g^Э$ :

$$V^Э - A_I g^Э \leq \varepsilon_0 \text{ - связь найдена} \quad (2)$$

При условии возможности использования коэффициентов  $A_I$  осуществляется прогноз в области  $R^K$ . В противном случае в геолого-геофизическом отношении прогнозная точка значительно отличается от эталонной области и необходимо выполнить разбиение исследуемой области согласно второй классификации  $C_2$ .

Придерживаясь полной комплексности подхода в рамках диссертационной работы выполнен поиск корреляционных связей скоростей СВДЗК территории Беларуси с такими параметрами как рельеф дневной поверхности  $h$ , гравитационное  $\Delta g$  и магнитное поле  $\Delta T$ , мощность земной коры  $H_{МОХО}$ , тектоническое районирование  $G$ .

Общий вид уравнения, связывающего скорости СВДЗК с перечисленными параметрами, имеет следующий вид:

$$V = f(h, \Delta g, \Delta T, H_{МОХО}, G), \quad (3)$$

где  $G$  – данные о геологическом строении земной коры, которые могут быть представлены в виде классификаций:  $C_1, C_2, \dots, C_\varphi$ .

Исходным материалом для определения числовых характеристик вертикальной составляющей СДЗК территории Республики Беларусь являлась «Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000», созданная ГУГК в 1989 году.

В качестве эталонных значений скоростей СВДЗК для поиска корреляционных связей использовались скорости реперов, расположенных на карте на линиях нивелирования I и II классов, без учета проведенных на карте изолиний. Для каждого репера, участвующего в прогнозировании скоростей СВДЗК, были найдены: рельеф дневной поверхности  $h$  по данным глобальной цифровой модели рельефа ETOPO1'; аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе  $\Delta g_{СВ.В}$  и в редукции Буге  $\Delta g_{БУГЕ}$  по данным глобальной гравитационной модели Земли GECO; магнитные аномалии  $\Delta T$  согласно «Карты магнитных аномалий Беларуси» (по Г.И. Каратаеву, Ж.П. Хотько, Б.В. Бондаренко и др.); мощность земной коры  $H_{МОХО}$  по «Карте мощности земной коры на территории Беларуси», составленной Р.Г. Гарецким.

На основании представленного набора данных составлены уравнения типа (3), в которых с помощью метода наименьших квадратов найдены неизвестные коэффициенты связи.

Анализ результатов, характеризующих тесноту связи скоростей СВДЗК  $V$  с  $h$ ,  $\Delta g_{СВ.В}$ ,  $\Delta g_{БУГЕ}$ ,  $\Delta T$ ,  $H_{МОХО}$  в целом для всей территории Беларуси, показал отсутствие

какой-либо значимой связи между перечисленными параметрами в данной  $C_1$ -классификации. Исходя из этого, для поиска корреляционных связей выполнено разделение территории Беларуси на основании «Карты тектонического районирования Беларуси» на классы ( $C_2$ -классификация): Оршанская впадина, Припятский прогиб, Полесская седловина, Подляско-Брестская впадина, Белорусская антеклиза.

Нахождение уравнения регрессии  $f_i(i=1,2,\dots,\varphi)$  в каждом классе осуществлялось на основе анализа построенных для каждой отдельной структуры корреляционных графиков. Анализ графиков корреляции для всех перечисленных выше структур  $C_2$ -классификации показал, что связь  $V$  с  $h$ ,  $\Delta g$ ,  $\Delta T$ ,  $H_{\text{МОХО}}$  должна быть криволинейного типа и наилучшим образом определяется при использовании квадратичной функции:

$$V = a_1 + b_1 X + c_1 X^2 \quad (4)$$

где  $X$  – один из перечисленных параметров;

$a, b, c$  – коэффициенты связи перечисленных параметров со скоростями СВДЗК.

Наличие связи между регрессионной моделью и эталонными значениями скоростей определялось при помощи корреляционного отношения (5) для криволинейной функции.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_E^2}{\sigma_V^2} \quad (5)$$

где  $\sigma_V^2 = \frac{[(V_i - V_{CP})^2]}{n}$  - мера общего разброса  $V$  относительно среднего;

$\sigma_E^2 = \frac{[(V_i^{\text{МОД}} - V_i)^2]}{n}$  - мера остаточного разброса  $V$  относительно модели.

Для значимости коэффициента детерминации  $R^2$  выдвигалась нулевая гипотеза о не значимости исследуемого коэффициента, а затем строилась контрольная статистика  $F$  вида

$$F = \frac{R^2(n - m - 1)}{m(1 - R^2)} \quad (6)$$

которая имеет  $F$ -распределение Фишера с  $f_1 = m$  и  $f_2 = n - m - 1$  степенями свободы и с  $m = k - 1$  ( $k$  - число коэффициентов при переменных). Получив теоретический

квантиль  $F$ -распределения Фишера  $F_{P, f_1, f_2}$ , далее выполнялась операция сравнения по схеме: если  $F > F_{P, f_1, f_2}$ , то гипотеза о не значимости коэффициента детерминации опровергается с доверительной вероятностью  $P$ .

Значение ошибки корреляционного отношения определялось с использованием формулы

$$\sigma_R^2 = \frac{m(1-R^2)}{n-m-1} \quad (7)$$

Оценка точности регрессионных моделей выполнена по сходимости модельных скоростей с эталонными скоростями карты СВДЗК СССР, 1989г.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum (V_{\text{МОДЕЛЬ}} - V_{\text{ЭТАЛОН}})^2}{n}} \quad (8)$$

Для иллюстрации представленного положения в таблице 1 приведены данные о связи  $V$  с  $h$ ,  $\Delta g$ ,  $H_{\text{МОХО}}$ ,  $\Delta T$  для Оршанской впадины.

Таблица 1. Парные связи  $V$  с  $h$ ,  $\Delta g_{\text{СВ.В}}$ ,  $\Delta g_{\text{БУГЕ}}$ ,  $H_{\text{МОХО}}$ ,  $\Delta T$  для Оршанской впадины

Наименов. структуры	Уравнение регрессии	$R^2$	$P$	$\sigma_R^2$	$\varepsilon$ , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = -19,684 + 0,1691h - 0,00035h^2$	0,89	0,99	0,04	0,23	( $\approx 20-30\%$ )
	$V = -0,625 - 0,0587\Delta g_{\text{СВ.В}} - 0,0077\Delta g_{\text{СВ.В}}^2$	0,56	0,90	0,15	0,44	( $\approx 20-40\%$ )
	$V = -7,587 - 0,6047\Delta g_{\text{БУГЕ}} - 0,01276\Delta g_{\text{БУГЕ}}^2$	0,71	0,95	0,10	0,36	( $\approx 20-40\%$ )
	$V = 64,841 - 2,699H_{\text{МОХО}} + 0,027528H_{\text{МОХО}}^2$	0,48	0,85	0,17	0,49	( $\approx 30-50\%$ )
	$V = -1,0086 - 0,1967\Delta T + 0,1097\Delta T^2$	0,27	0,40	0,18	0,62	( $\approx 40-60\%$ )

Следует отметить, что для одной структуры в виде Белорусской антеклизы связь  $V$  с  $h$ ,  $\Delta g$ ,  $H_{\text{МОХО}}$ ,  $\Delta T$  оказалась слабой и не может быть объяснена с высокой степенью доверия каким-либо видом уравнения связи. Из этого следует необходимость введения  $C_3$ -классификации для Белорусской антеклизы, которую составили следующие классы: Центрально-Белорусский массив, Вилейский погребенный выступ, Бобруйский погребенный выступ, Воложинский грабен, Ивацевичский погребенный выступ, Мазурский погребенный выступ.

Окончательный этап исследования состоял в комплексном привлечении всех перечисленных ранее параметров для прогнозирования скоростей СВДЗК. Так, для Оршанской впадины обобщенное уравнение регрессии  $V$  совместно с  $h$ ,  $\Delta g$ ,  $\Delta T$ ,

$H_{МОХО}$  повысило значение корреляционного отношения до  $R^2=0,92$  при доверительной вероятности  $P=0,99$ ,  $\sigma_R^2=0,03$  и  $\varepsilon=0,18$  мм.

При помощи уравнений регрессии  $V$  совместно с  $h$ ,  $\Delta g$ ,  $H_{МОХО}$ ,  $\Delta T$  для всей территории Республики Беларусь сделан прогноз скоростей СВДЗК (Рисунок 1).

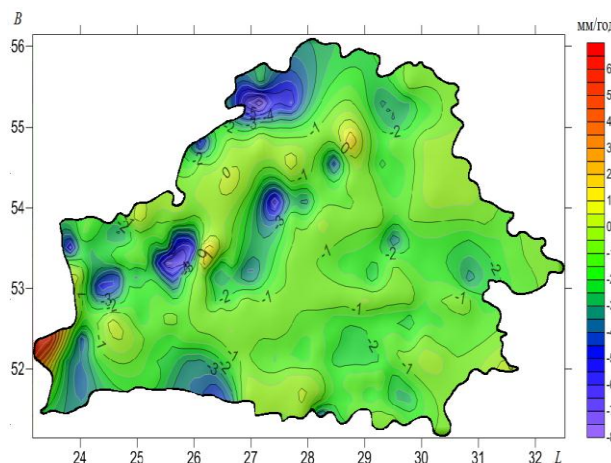


Рисунок 1. Модель скоростей СВДЗК, полученная с использованием обобщенных уравнений регрессии и метода интерполяции «блочный Kriging»

Количественная характеристика степени совпадения модельной карты с эталонными точками показала, что наиболее часто встречающиеся разности от -0,4 до +0,4 мм/год составляют 87% (СКП=0,32 мм/год).

Опираясь на исследования Г.И. Каратаева, А.А. Святогорова, А.Т. Донабедова, Р.Е. Айзберга, А.С. Махнача и др. можно утверждать, что общей закономерностью для СВДЗК является приуроченность зон высоких градиентов скоростей движений земной коры к границам региональных блоков в виде разломов. Основываясь на этом, выполнено сопоставление модельной карты СВДЗК и карты ГУГК 1989г. с тектоническими разломами Беларуси.

На основе анализа градиентов скоростей СВДЗК модельной карты хорошо выделяются Минский, Докшицкий, Чашникский, Полоцкий, Пружанский и Островецкий разломы. Анализ карты ГУГК 1989г. не выявил приуроченных к тектоническим разломам значительных градиентов скоростей СВДЗК.

Таким образом, можно отметить, что прогнозирование скоростей СВДЗК на территориях, состоящих из разновозрастных и разнотипных геоструктурных элементов и обладающих редкой сетью линий повторного нивелирования должно

выполняться с использованием корреляционной модели прогноза скоростей СВДЗК по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных. Применение метода простого линейного интерполирования не оправдывает себя и заведомо ведет к ошибкам прогнозирования.

**В третьей главе** диссертационной работы представлена методика геодезического мониторинга геодинамических процессов по результатам ГНСС-измерений с обеспечением многодисциплинарного подхода. Методика апробирована на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС». Базой для представленной методики являются:

*1. Надежное установление местоположения тектонических разломов на местности и мест закладки относительно них геодезических центров.*

Проектирование геодинамического полигона (ГДП) выполнялось на основании результатов геодезических, геофизических и сейсмологических исследований 2006-13 гг. в районах, примыкающих к Полоцкой ГЭС. Анализ данных этих исследований показал, что расположение геодезических пунктов на ГДП «Полоцкая ГЭС» должно обеспечить получение максимально достоверной информации о деятельности Полоцкого, Чашникского и Туровлянского тектонических разломов.

Для надежности выбора мест закладки центров пунктов на ГДП были привлечены специалисты отдела аэрокосмических исследований государственного предприятия «НПЦ по геологии» НАН Беларуси. В результате совместных с ними работ по структурному дешифрированию имеющихся на исследуемый район материалов аэросъемки и космической съемки были установлены оптимальные положения центров всех пунктов геодезической сети.

*2. Центры должны быть максимально устойчивыми к влияниям нетектонического происхождения.*

Центры пунктов на ГДП «Полоцкая ГЭС» заложены в землю на глубину три метра, что ниже наибольшей из максимальных глубин промерзания грунта для представленной территории на 1,8 метра. Закладка пунктов выполнена способом

бурения с отбором пород грунта и в присутствии геолога. Конструкция центров пунктов предусматривает принудительное центрирование спутниковых антенн.

Используемый тип геодезического центра является полезной моделью Полоцкого государственного университета «Геодезический репер для грунтов с сезонным промерзанием» (патент № U 20130561 от 23.08.2013г.).

3. Вид и методики геодезических измерений должны обеспечивать максимальную точность результатов измерений.

Геодезическое оборудование и методика производства ГНСС-измерений выбраны, исходя из необходимости достижения точности измерений не хуже 3 мм в плане, что в два раза жестче требований к точности, утвержденных законодательно в РБ «Методическим руководством по геодезическим работам на геодинамических полигонах, 1985г. (ЦНИИГАиК)».

На основании разработанной методики и геометрии сети принято решение в процессе измерений использовать пять двухчастотных спутниковых приемников фирмы Trimble. Для выполнения наблюдений запроектировано три расстановки спутниковых приемников, которые образуют серию (Рисунок 2). Программа ГНСС-измерений в сети состоит из двух серий измерений.

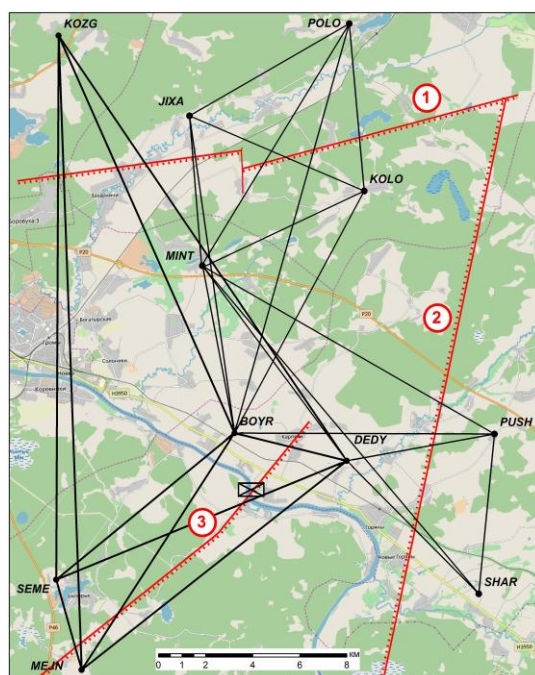




Рисунок 2. Схема геодезической сети ГДП «Полоцкая ГЭС» и тектонические разломы  
 - Полоцкая ГЭС;  – тектонические разломы: ① – Полоцкий; ② – Чашникский; ③ – Туровлянский

4. *Строгая математическая обработка результатов повторных геодезических измерений, приводящая к определению вероятнейших характеристик исследуемых деформаций и достоверной оценке точности.*

Уравнивание ГНСС-сети во всех циклах измерений (2014г., 2015г., 2017г.) выполнено параметрическим способом без предварительного фиксирования исходных дат. Подобная процедура уравнивания основана на теории уравнивания «свободной сети» [V. Ashkenazi, 1974; F.K. Brunner, R. Coleman and Hirsh, 1981; М.Д. Герасименко, Г.А. Шароглазова 1985].

Уравнивание в каждую эпоху измерений выполнялось трижды: каждая серия отдельно, а затем обе серии совместно. По результатам отдельной обработки сравнивались значения сторон и превышений между двумя сериями наблюдений и выполнялась оценка точности по известной формуле разностей двойных измерений (9), что повышает достоверность точностных характеристик исследуемых величин [В.И. Кафтан, 2000; М.С. Ескі, 2001; Л.И. Серебрякова, В.П. Горобец, Л.Ю. Козлова, Р.А. Сермягин, 2006; А.А. Струков, 2011].

$$m = \sqrt{\frac{\sum (d^2)}{2n}}, \quad (9)$$

где,  $m$  - средняя квадратическая погрешность измерения;  $d$  - разность между сериями оцениваемой величины;  $n$  - число разностей (линий или превышений).

5. *Наглядное представление характеристик деформаций и их интерпретация.*

Характеристики горизонтальных деформаций земной коры на исследуемой территории представлены разностями сторон между эпохами наблюдений, векторами смещений, а также компонентами деформации в виде Q-дилатации,  $E_1, E_2$ -максимального и минимального растяжений и его направлений  $\varphi_{E1}, \varphi_{E2}$ ,  $\gamma_m$ -максимального сдвига. Последние характеристики деформаций, как известно [Н.П. Есиков, 1982; О.М. Остач, 1984], максимально свободны от выбора системы отсчета. Для аппроксимации территории использован метод конечных элементов.

При построении конечно-элементной модели рассматривался вопрос оптимального выбора конфигурации и площади элементов геодезической сети. Численный эксперимент на моделях треугольных элементов сети показал, что



конфигурация элементов сети, близкая к равностороннему треугольнику, является оптимальной при равенстве средних квадратических ошибок ( $m_x=m_y$ ) в каждом цикле измерений и стремится к вытянутому равнобедренному с отклонением соотношения ( $m_x/m_y$ ) от единицы.

Согласно полученным результатам наилучшая реализация элементов конечно-элементной сети ГДП «Полоцкая ГЭС» достаточно близко соответствует равностороннему треугольнику. Таким образом, моделирование сети выполнялось путем построения «оптимальной триангуляции Делоне».

Распределение вычисленных параметров деформации на ГДП «Полоцкая ГЭС» показало, что за представленный временной период строительства, пуска и эксплуатации ГЭС на исследуемой территории присутствуют значимые деформации растяжения земной коры, характеризующиеся как площадным характером расширения (Рисунок 3), так и сдвиговыми деформациями.

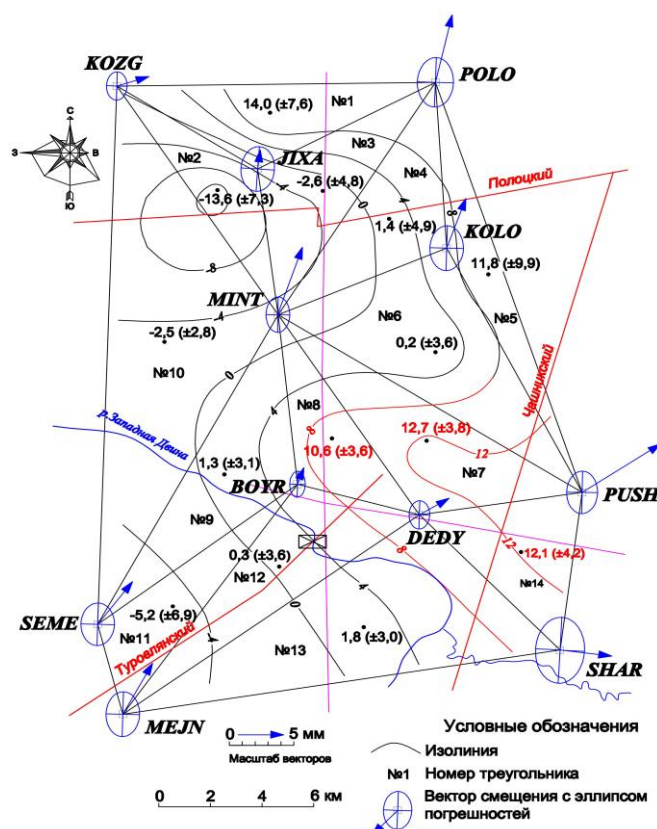


Рисунок 5. Схема распределения дилатации  $Q$  на ГДП «Полоцкая ГЭС» за период 2015-2017 гг.

$12,7 (\pm 3,8)$  - значимое значение деформации  $Q$  и характеристика точности определения в ед.  $10^{-7}$ ;

☒ - Полоцкая ГЭС; — - тектонические разломы

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены исследования по моделированию неприливных вариаций ускорения силы тяжести и оценке влияния данных вариаций на параметры вертикальных деформаций земной коры в условиях равнинной территории Беларуси.

В качестве общей оценки вариаций гравитационного поля на исследуемой территории выбран Белорусский геодинамический гравиметрический полигон, линии которого проходят через все крупные тектонические структуры страны. Вариации гравитационного поля на данном полигоне определялись относительно опорного гравиметрического пункта «Лида» на основании результатов гравиметрических измерений, выполненных в 1996г. и 1998г «Институтом геологических наук НАН Беларуси».

Моделирование неприливных вариаций ускорения силы тяжести выполнено с использованием подхода профессора Г.И. Каратаева, суть которого подробно описана в Главе 2. Прогнозирование вариаций ускорения силы тяжести выполнено по модели скоростей СВДЗК  $V$  (Рисунок 1), построенной по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных. Геотектонические особенности исследуемой территории  $G$  задавались на основании «Карты тектонического районирования Беларуси».

На основании представленного набора данных составлены уравнения типа (10), в которых с помощью метода наименьших квадратов найдены неизвестные коэффициенты связи.

$$\delta g_t = f(V, G), \quad (10)$$

Анализ результатов, характеризующих тесноту связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  и скоростей СВДЗК  $V$  в целом для всей территории Беларуси, показал отсутствие значимой связи между перечисленными параметрами.

На основании представленного для поиска корреляционных связей в соответствии с геотектоническими особенностями выполнено разделение исследуемой территории на классы ( $C_2$ -классификация): Белорусская антеклиза, Припятский прогиб, Латвийская седловина, Оршанская впадина.

Детальный анализ корреляционных графиков между сопоставляемыми параметрами для всех перечисленных структур  $C_2$ -классификации показал, что связь  $\delta g_t$  с  $V$ , также как и связь между  $V$  и геодезическими, геолого-геофизическими и сейсмологическими данными для территории Беларуси наилучшим образом определяется при использовании квадратичной функции:

$$\delta g_t = a + bV + cV^2 \quad (11)$$

где  $\delta g_t$  – изменение величины силы тяжести (мГал),  $V$  – скорости СВДЗК (мм/год),  $a, b, c$  – коэффициенты связи изменения силы тяжести со скоростями СВДЗК.

Наличие связи между регрессионной моделью и эталонными значениями вариаций ускорения силы тяжести определялось также как и в Главе 2. Для иллюстрации представленного положения в таблице 2 приведены данные о связи  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для тектонических структур Беларуси.

Таблица 2. Корреляционные связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для тектонических структур Беларуси

Наименование структур	Уравнение регрессии	$R^2$	$P$	$\sigma_R^2$	$\varepsilon$ , мГал	$\frac{\varepsilon}{\Delta g_t} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$\delta g_t = -0,15462 + 0,16234V + 0,11797V^2$	0,73	0,85	0,18	0,06	( $\approx 40-50$ )
Латвийская седловина	$\delta g_t = -0,34325 - 0,1205V + 0,0099V^2$	0,62	0,65	0,33	0,11	( $\approx 40-50$ )
Припятский прогиб	$\delta g_t = -0,28595 - 0,00011V + 0,28758V^2$	0,84	0,90	0,11	0,05	( $\approx 30-40$ )
Белорусская антеклиза	$\delta g_t = -0,0585 + 0,01658V + 0,0004V^2$	0,25	0,55	0,25	0,13	( $\approx 90-100$ )

Следует отметить, что также как и в Главе 2 для одной структуры в виде Белорусской антеклизы связь  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  оказалась слабой и не может быть объяснена с высокой степенью доверия каким-либо видом уравнения связи. Это потребовало введения  $C_3$ -классификации, что позволило повысить значения корреляционных отношений структур Белорусской антеклизы до уровня тектонических структур из  $C_2$ -классификации.

При помощи полученных уравнений корреляционных связей сделан прогноз вариаций ускорения силы тяжести (Рисунок 6).

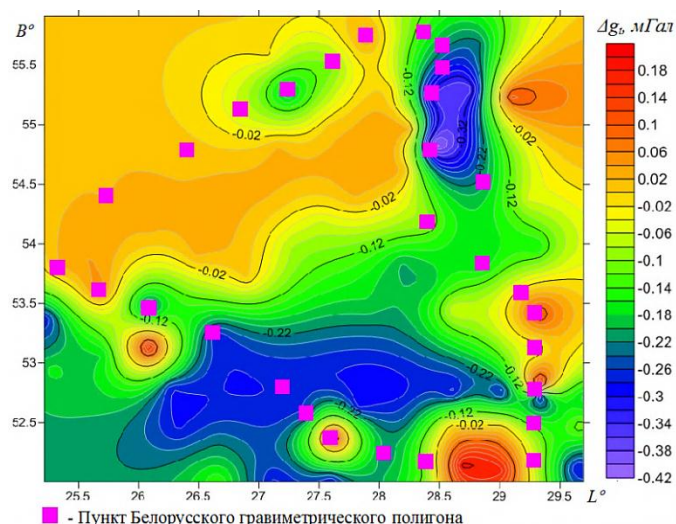


Рисунок 6. Модельная карта вариаций ускорения силы тяжести на территорию Белорусского геодинамического гравиметрического полигона (сечение 0,02 мГал)

Оценка точности модели показала, что ошибки моделирования (СКП=0,03 мГал) сопоставимы с точностью инструментальных гравиметрических измерений, являющихся исходными для моделирования. Максимальные вариации ускорения силы тяжести наблюдаются в северной части и составляют -0,20 – -0,32 мГал.

Для расчета влияния данных вариаций ускорения силы тяжести на результаты повторного геометрического нивелирования были определены величины изменения направления отвеса  $\Theta$  на исследуемой территории за представленный временной период при условии равновероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат (12) [Э.Э. Фотиади, 1976]. Ускорение силы тяжести  $g$  получено по данным глобальной модели поля силы тяжести Земли GECO.

$$\Theta'' = 2 \frac{\delta g_t}{g} \quad (12)$$

Расчет влияния изменения направления отвеса  $\Theta$  на результаты геометрического нивелирования, проложенного по некоторым линиям Белорусского геодинамического гравиметрического полигона представлен в таблице 3. Рассчитанная величина  $\delta h$  больше ошибок высокоточного нивелирования

$$m = \pm \sqrt{0,8^2 L + 0,08^2 L^2}, \text{ мм} \quad (14)$$

Таблица 3. Влияние изменения направления отвеса  $\Theta$  за период 1996-1998гг. на результаты геометрического нивелирования

Нивелирный ход	$L$ , км	$\theta_i$ , "	$\theta_{i+1}$ , "	$\theta_{cp}$ , "	$\delta h$ , мм	$m$ , мм
Янковичи- Полоцк...	40	0,043	0,055	0,049	9,5	6,0
Полоцк-Ушачи.....	40	0,055	0,064	0,060	11,6	6,0
Ушачи-Лепель.....	45	0,064	0,065	0,064	14,0	6,4
Лепель- Холопеничи	52	0,065	0,042	0,054	13,6	7,1
Кр. Слобода- Несвиж...	56	0,056	0,053	0,054	14,7	7,5
Несвиж- Кореличи.....	58	0,053	0,047	0,050	14,1	7,7

Полученные результаты позволяют поставить под сомнение выводы об отсутствии необходимости учета влияния вариаций гравитационного поля на результаты повторного геометрического нивелирования, проложенного на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях [М.И. Юркина, 1976].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные итоги диссертации

Оставаясь в рамках традиционного подхода по изучению геодинамических процессов отдельными инструментальными методами (геодезическими, геофизическими, сейсмологическими и др.) невозможно создать точную модель современных движений земной коры. В диссертационной работе обоснована необходимость комбинированного использования данных различных методов наблюдений и интерпретации при изучении СДЗК, что является ключевой идеей совершенствования геодезических методов мониторинга геодинамических процессов.

В процессе выполненных исследований **получены следующие новые научные результаты:**

Разработан алгоритм построения карт скоростей СВДЗК с использованием корреляционной модели прогноза скоростей СВДЗК по совместному набору геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

Разработана и апробирована методика мониторинга современных движений земной коры на геодинамическом полигоне по результатам ГНСС-измерений с обеспечением междисциплинарного подхода.

Разработан алгоритм построения карт вариаций ускорения силы тяжести с использованием корреляционной модели прогноза вариаций по модели скоростей современных вертикальных движений земной коры.

Выполнена оценка вариаций гравитационного поля на примере территории Республики Беларусь, доказывающая необходимость учета влияния вариаций на параметры вертикальных деформаций земной коры даже на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях, что не регламентируется нормативными документами в области производства нивелирования.

На основании решенных задач можно сделать следующие **выводы и рекомендации:**

Разработанный алгоритм прогнозирования скоростей СВДЗК может быть использован для практического построения карт скоростей СВДЗК и рекомендуется в качестве замены метода линейного интерполирования, применяемого при составлении существующих карт.

Разработанная методика мониторинга СДЗК по данным спутниковых высокоточных измерений с обеспечением многодисциплинарного подхода успешно прошла апробацию на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС» и рекомендуется для получения наиболее точных характеристик деформаций земной поверхности на территориях, характеризующихся малыми тектоническими деформациями, а также в местах расположения геодинамических полигонов в районах взаимообусловленных влияний тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры.

Разработанный алгоритм прогнозирования вариаций ускорения силы тяжести рекомендуется для построения карт вариаций ускорения силы тяжести на территориях, слабо обеспеченных повторными гравиметрическими измерениями и состоящих из разнотипных геоструктурных элементов.

Результаты оценки влияния вариаций гравитационного поля по данным гравиметрических наблюдений Беларуси свидетельствуют о необходимости учета влияния этих вариаций на параметры вертикальных деформаций земной коры даже на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях Восточно-Европейской платформы.

## **Перспективы**

Построенные карты скоростей СВДЗК и вариаций ускорения силы тяжести на территорию Беларуси требуют дальнейшего уточнения путем привлечения большего объема информации, покрывающей всю территорию республики, и большей плотности и точности геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

Следующим этапом развития представленной в работе методики геодезического мониторинга геодинамических процессов по данным высокоточных ГНСС-измерений является ее автоматизация путем разработки специально ориентированного программного обеспечения, выполняющего анализ деформационных процессов по результатам ГНСС-измерений и позволяющего создавать визуализации исследуемых процессов с привлечением ГИС технологий.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. **Маркович, К. И.** К вопросу использования различных моделей калибровок GPS-антенн, типов куполов, масок по углу возвышения при обработке GNSS-измерений / В. В. Ялтыхов, **К. И. Маркович** // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2016. – № 4. – С. 40–52.
2. **Маркович, К. И.** Приведение результатов геометрического нивелирования в систему нормальных высот с использованием глобальных гравитационных моделей Земли / **К. И. Маркович** // Геодезия и картография. – 2018. – № 5. – С. 2–9.
3. **Маркович, К. И.** Результаты исследований деформаций земной коры в районе каскада гидроэлектростанций на р. Западной Двине / Г. А. Шароглазова, **К. И. Маркович** // Геодезия и картография. – 2018. – № 10. – С. 7–15.
4. **Маркович, К. И.** Влияние конфигурации конечных элементов на точность определения компонентов деформации / **К. И. Маркович** // Вестник

Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2019. – № 3. – С. 37–51.

5. **Маркович, К. И.** Применение корреляционной модели прогноза для построения карты скоростей современных вертикальных движений земной коры Республики Беларусь по данным различных наук о Земле / **К. И. Маркович** // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2020. – № 2. – С. 30–45.

6. **Маркович, К. И.** Моделирование неприливных вариаций гравитационного поля с использованием корреляционной модели прогноза / **К. И. Маркович** // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2020. – № 2. – С. 249–258.

**Статьи в других научных изданиях:**

7. **Маркович, К. И.** Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры по геодезическим, геолого-геофизическим и сейсмологическим данным / **К. И. Маркович** // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – № 2. – С. 365–377.