



12+

Фон Бабенберг

Лето на 69-й параллели

Научная фантастика

Фон Бабенберг

Лето на 69-й параллели.

Научная фантастика

<https://litres.ru/74268953>

ISBN 9785007062879

Аннотация

Это секретный дневник планеты через 50 миллионов лет. Внутри: тектонические плиты ползут, как гигантские улитки; ледники вздыхают и тают; полюса пустились в пляс; континенты играют в перетягивание каната.

Универсальное уравнение движения? Есть. Климатический сценарий? Ещё какой.

Добро пожаловать в геодинамический цирк будущего. Гренландия станет зелёным раем, Антарктида — круглогодичным курортом,

Предупреждение: после прочтения вам захочется построить машину времени.

Содержание

НЕОТЕКТОНИКА И ДРЕЙФ АНТАРКТИДЫ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЁТОМ ДРЕЙФА ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ И УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ	9
АННОТАЦИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ	11
ГЛАВА 1. НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОСНОВА: ГЛАЦИОИЗОСТАЗИЯ И АКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ	13
1.1. Пространственно-временная структура вертикальных движений	13
1.2. Горизонтальные деформации как индикатор внутриплитной активности	14
1.3. Влияние ледовой нагрузки на момент инерции плиты	15
ГЛАВА 2. КИНЕМАТИКА ДРЕЙФА: СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ИСТОРИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ И ДРЕЙФ ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ	16
2.1. Палеомагнитные реконструкции на интервале 50—0 млн лет	16
2.2. Современная кинематика по GNSS и	17

глобальным моделям	
2.3. Дрейф полюса вращения:	18
терминология и оценки на интервале ± 50 млн лет	
2.4. Вековые изменения угловой скорости:	18
экстраполяция на ± 50 млн лет	
ГЛАВА 3. ИНТЕГРАЛЬНАЯ	20
МОДЕЛЬ «ПОЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОЙ	
СВЯЗКИ» (ПВС)	
3.1. Полный вывод уравнений движения	20
плиты с учётом неотектонического момента	
3.2. Переход к угловой скорости: вклад	23
неотектоники и дрейфа полюса	
3.3. Анализ чувствительности к вязкости и	24
дегляциации	
ГЛАВА 4. УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ	25
НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ	
ЛЕТ: РЕТРОСПЕКТИВА, ПРОГНОЗ И	
АСИММЕТРИЯ	
4.1. Методология двунаправленного	25
моделирования	
4.2. Ретроспективная верификация:	26
интервал 0—50 млн лет назад	
4.3. Прогноз на 50 млн лет вперёд	27
(детерминированный и вероятностный)	
4.4. Асимметрия геодинамического режима	28

на интервале ± 50 млн лет	
4.5. Климатические и гляциологические следствия на интервале ± 50 млн лет	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	32
НЕОТЕКТОНИКА И ДРЕЙФ ГРЕНЛАНДИИ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЁТОМ ДРЕЙФА ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ И УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ	35
АННОТАЦИЯ	35
ВВЕДЕНИЕ	37
ГЛАВА 1. НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОСНОВА ГРЕНЛАНДИИ: ГЛЯЦИОИЗОСТАЗИЯ, СЕТЬ GNET И АКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ	41
1.1. Структура ледникового щита и его влияние на кору	41
1.2. Данные сети GNET: вертикальные скорости и их интерпретация	42
1.3. Асимметрия Восток—Запад и роль Исландского плюма	43
1.4. Горизонтальные деформации: растяжение и сжатие	44
1.5. Проблема разделения тектонического и гляциоизостатического сигналов	45
ГЛАВА 2. КИНЕМАТИКА ДРЕЙФА	47

ГРЕНЛАНДСКОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-
АМЕРИКАНСКОЙ ПЛИТЫ:
СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ,
ИСТОРИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ И ДРЕЙФ
ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ

2.1. Палеомагнитные и геологические реконструкции: распад Северной Атлантики	47
2.2. Современная кинематика по GNSS и глобальным моделям	49
2.3. Дрейф полюса вращения Гренландской части Северо-Американской плиты	50
Конец ознакомительного фрагмента.	51

Лето на 69-й параллели

Научная фантастика

Фон Бабенберг

© Фон Бабенберг, 2026

ISBN 978-5-0070-6287-9

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

ГЕОДИНАМИКА ЗЕМНОЙ КОРЫ

НЕОТЕКТОНИКА, ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ
И ПОЛЯРНО-ВЯЗКОСТНАЯ СВЯЗКА



НЕОТЕКТОНИКА И ДРЕЙФ АНТАРКТИДЫ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЁТОМ ДРЕЙФА ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ И УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

АННОТАЦИЯ

Монография посвящена синтезу новейших (неотектонических) движений земной коры Антарктиды, обусловленных гляциоизостатическими эффектами, и долгопериодного дрейфа литосферной плиты. Предложена количественная модель «полярно-вязкостной связки» (ПВС), в которой несимметричная ледовая нагрузка создаёт дополнительный момент сил, модулирующий угловую скорость вращения плиты (вклад $\sim 1,4\%$). Впервые в явном виде введён дрейф полюса вращения плиты относительно мантии (раздельно истинное полярное блуждание и относительное движение полюса) как самостоятельный параметр, изменяющийся

прогноз на 10—15%. Выполнено углублённое исследование на симметричном интервале ± 50 млн лет (50 млн лет в прошлое и 50 млн лет в будущее) с использованием единого набора уравнений. Ретроспективная часть верифицирована по палеомагнитной базе PALEOMAGIA (расхождение $0,46^\circ$ по широте для интервала 50—0 млн лет). Прогноз вперёд на 50 млн лет, полученный методом Монте-Карло (1000 реализаций), даёт смещение центра масс Антарктиды на 720 ± 100 км в северо-северо-западном направлении (азимут 341°), что выводит Антарктический полуостров на широты $56\text{—}58^\circ$ ю.ш. и запускает необратимую деградацию ледникового щита (потеря 35—45% объёма). Показано, что геодинамический режим Антарктиды в интервале —50...+50 млн лет несимметричен: в прошлом угловая скорость уменьшалась быстрее (падение на 36% за 50 млн лет), в будущем ожидается более плавное замедление (23%) и затухание неотектонического вклада.

Ключевые слова: Антарктида, неотектоника, дрейф континентов, дрейф полюса вращения, полярно-вязкостная связка, прогноз на 50 млн лет, ретроспективный анализ, интервал ± 50 млн лет.

ВВЕДЕНИЕ

Антарктида — единственный континент, чья геодинамика на кайнозойском этапе определялась взаимным наложением гляциоизостатических вертикальных движений, латерального дрейфа литосферной плиты и дрейфа самого полюса вращения плиты относительно мантии. Классические подходы рассматривали эти процессы отдельно, что приводило к противоречивым прогнозам положения континента на временах порядка 50 млн лет. В настоящей монографии впервые предпринят углублённый анализ на симметричном интервале ± 50 млн лет (от 50 млн лет в прошлом до 50 млн лет в будущем), что позволяет не только верифицировать модель по геологическим данным, но и выявить асимметрию геодинамического режима.

Основные задачи расширенного исследования:

построить единую интегральную модель ПВС, справедливую как для экстраполяции назад, так и вперёд;

выполнить ретроспективный расчёт положения Антарктиды на интервале 0—50 млн лет назад и сравнить с палеомагнитными данными;

выполнить прогноз на 50 млн лет вперёд с вероятностной оценкой;

сравнить эволюцию ключевых параметров (угловая скорость, положение полюса вращения, вклад неотектоники) в

прошлом и будущем, выявив степень асимметрии;
дать климатическую и гляциологическую интерпретацию полученных результатов.

Методологическая база: GNSS-данные сети POLENET [1], модели GIA ICE-6G_C [2], IJ05_R2 [3], кинематические модели NNR-MORVEL56 [6] и ITRF2020 [19], палеомагнитная база PALEOMAGIA [40], численное интегрирование уравнений вращательного движения методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом 0,1 млн лет, ансамблевое моделирование Монте-Карло (1000 реализаций). Код модели и входные данные доступны по запросу у авторов.

Структура монографии: Глава 1 — неотектоническая основа (гляциоизостазия, активные деформации). Глава 2 — кинематика дрейфа: палеомагнитные реконструкции, современные GNSS, дрейф полюса. Глава 3 — интегральная модель ПВС (полный вывод уравнений). Глава 4 — углублённый анализ на интервале ± 50 млн лет: ретроспектива, прогноз, асимметрия. Заключение — основные результаты и рекомендации.

ГЛАВА 1. НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОСНОВА: ГЛЯЦИОИЗОСТАЗИЯ И АКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Пространственно-временная структура вертикальных движений

Неотектонические движения в Антарктиде в подавляющем большинстве обусловлены гляциоизостатической корректировкой (GIA) — реакцией литосферы и мантии на изменение ледовой нагрузки после последнего ледникового максимума (21 тыс. лет назад). Сеть непрерывных GNSS-станций POLENET [1] (127 пунктов, 1995—2025) позволяет измерять вертикальные скорости с точностью до 0,5 мм/год. Результаты показывают ярко выраженную асимметрию: Восточно-Антарктический кратон (мощность литосферы до 250 км) поднимается со скоростями 0—3 мм/год, в то время как Западная Антарктида (литосфера 60—80 км, тепловой поток 85—100 мВт/м²) демонстрирует подъём до 15 мм/год в районе Земли Мэри Бэрд и Антарктического полуострова. Исключение — бассейн Уилкса (Восточная Антарктида), где наблюдается слабый прогиб (—6 мм/год), интерпретируемый как остаточная депрессия от более мощного льда

в прошлом.

Для разделения GIA и тектонических вертикальных движений использованы три независимые модели: ICE-6G_C [2], IU05_R2 [3] и W12a [4]. Расхождения моделей в глубинных районах Восточной Антарктиды (Купол С, Купол А) достигают 3—4 мм/год, что вносит систематическую ошибку в оценки горизонтального дрейфа (см. главу 2). Причина расхождений — неопределённость в истории дегляциации внутренних областей Восточной Антарктиды, где лед оставался стабильным последние 10 млн лет.

1.2. Горизонтальные деформации как индикатор внутриплитной активности

Долгое время Антарктиду считали асейсмичной и тектонически пассивной, однако современные сейсмические сети (GSN, AGAP, TAMNNET) зафиксировали сотни событий с магнитудами Mw 2—4,5, а также несколько событий Mw 5—6 в море Скотия. Пространственное распределение эпицентров приурочено к трём структурам:

Трансантарктические горы (ТАМ) — разломы Такер, Лип-Йир, Лантерман, Авиатор с правосдвиговой кинематикой. Скорости скольжения, оцененные по повторным GPS-измерениям, составляют 0,4—0,9 мм/год [41].

Западно-Антарктическая рифтовая система (WARS) — нормальные сбросы и бассейны растяжения (море Росса,

бассейн Бирдмора). Здесь деформации сдвига достигают 10^{-8} год^{-1} [42].

Антарктический полуостров и остров Десепшн — активный вулканизм и вулкано-тектоническая сейсмичность (последнее извержение 1970 г.) [27].

Наличие измеримых внутриплитных деформаций означает, что приближение «абсолютно жёсткой плиты» является только нулевым приближением. В интегральной модели (глава 3) это учтено через эффективную вязкость под кратоном и допущение о том, что на временах ≥ 50 млн лет деформации отдельных блоков могут быть усреднены.

1.3. Влияние ледовой нагрузки на момент инерции плиты

По данным Bedmap2 [15], современная ледовая нагрузка распределена крайне неравномерно: центр масс льда смещён относительно центра масс литосферной плиты на 320 км в направлении Трансантарктических гор. Это смещение создаёт асимметрию в тензоре инерции плиты, что приводит к появлению дополнительного гравитационного момента, когда плита вращается. Величина этого момента мала по сравнению с моментом от спрединговых сил (отношение $\sim 0,02$), но, как показано в главе 3, она не равна нулю и должна учитываться в точных прогнозах.

ГЛАВА 2. КИНЕМАТИКА ДРЕЙФА: СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ИСТОРИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ И ДРЕЙФ ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ

2.1. Палеомагнитные реконструкции на интервале 50—0 млн лет

Для углублённого анализа на интервале ± 50 млн лет были собраны и обработаны палеомагнитные данные из базы PALEOMAGIA [40] по Антарктиде за последние 50 млн лет. Всего использовано 28 определений виртуальных геомагнитных полюсов (VGP) для интервалов: 50—40, 40—30, 30—20, 20—10, 10—0 млн лет. Типичная погрешность определений составляет ± 3 — 5° по широте. Получена кривая широтного дрейфа центра масс плиты: 50 млн лет назад — около 63° ю.ш., 30 млн лет назад — 68° ю.ш., 10 млн лет назад — 73° ю.ш., современное положение — $75,5^\circ$ ю. ш. Эти данные служат основой для ретроспективной верификации модели в главе 4.

2.2. Современная кинематика по GNSS и глобальным моделям

Обработка данных 68 непрерывных GNSS-станций (1995—2025) выполнена в системе ITRF2020 с использованием программ GAMIT/GLOBK и GIPSY-OASIS. Горизонтальные скорости станций подчиняются вращательному полю с высокой когерентностью (среднее отклонение от модели жёсткого вращения составляет 0,8 мм/год, что близко к уровню шума). Получены следующие параметры в различных системах отсчёта:

NNR-MORVEL56 [6] (система без суммарного вращения, близкая к мантийной): полюс вращения ($58,2^\circ$ с.ш., $127,5^\circ$ з.д.), угловая скорость $\omega = 0,219 \pm 0,007^\circ/\text{млн лет}$.

ITRF2020 [19] (центр масс Земли, включает вращение относительно мантии): ($59,1^\circ$ с.ш., $126,8^\circ$ з.д.), $\omega = 0,225 \pm 0,006^\circ/\text{млн лет}$.

Горячие точки (модель HS3-NUVEL-1A): ($57,0^\circ$ с.ш., $129,2^\circ$ з.д.), $\omega = 0,210 \pm 0,010^\circ/\text{млн лет}$.

Различия между системами достигают $0,015^\circ/\text{млн лет}$ (около 7% от ω), что важно для долгосрочных прогнозов. В данной монографии в качестве базовой используется система NNR-MORVEL56 как наиболее приближённая к мантийной системе отсчёта. Линейная скорость центра масс плиты (приблизительно $75,5^\circ$ ю.ш., 120° в.д.) составляет $11,2 \pm 0,4$

мм/год, направление — азимут 343° (северо-северо-запад).

2.3. Дрейф полюса вращения: терминология и оценки на интервале ± 50 млн лет

В монографии принято следующее разграничение: истинное полярное блуждание (TPW) — движение всей Земли относительно оси вращения; относительный дрейф полюса плиты — изменение ориентации вектора Ω в системе горячих точек. Для интервала ± 50 млн лет скорость относительного дрейфа полюса Антарктической плиты составляет $0,09 \pm 0,03^\circ/\text{млн лет}$ (по [7]) и считается постоянной в первом приближении. За 50 млн лет полюс смещается на $4,5 \pm 1,5^\circ$. Это значение используется как в ретроспективном, так и в прогнозном расчётах.

2.4. Вековые изменения угловой скорости: экстраполяция на ± 50 млн лет

Аппроксимация палеомагнитных данных и реконструкций океанических изохрон [10] даёт угловую скорость как функцию времени: $\omega(t) = \omega_0 * \exp(-t/\tau)$ с $\omega_0 = 0,219^\circ/\text{млн лет}$, $\tau = 78 \pm 12$ млн лет. Здесь t отсчитывается от современности в будущее, а в прошлое — t отрицательное, т.е. $\omega(t) =$

$\omega_0 * \exp (-|t|/\tau)$ для $t < 0$ (симметричная экспонента). Однако данные показывают, что 50 млн лет назад ω была выше — около $0,34^\circ/\text{млн лет}$, что соответствует $\tau=78$ млн лет. Таким образом, экспоненциальная модель с постоянным τ справедлива как в прошлое, так и в будущее, но с разной начальной амплитудой (в будущем — от современного значения, в прошлом — от более высокого). В расчётах используется единая формула: $\omega(t) = \omega_0 * \exp (-t/\tau)$ для $t \geq 0$ (будущее) и $\omega(t) = \omega_0 * \exp (+t/\tau)$ для $t < 0$ (прошлое), где t отрицательно. Это обеспечивает непрерывность в $t=0$.

ГЛАВА 3. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ «ПОЛЯРНО- ВЯЗКОСТНОЙ СВЯЗКИ» (ПВС)

3.1. Полный вывод уравнений движения плиты с учётом неотектонического момента

Рассмотрим литосферную плиту как твёрдое тело с переменным тензором инерции $I(t)$, которое движется в вязкой мантии. Уравнение вращательного движения в системе отсчёта, связанной с центром масс Земли (невращающейся, но с ускоренным движением центра масс — пренебрегаем), имеет вид:

$$d/dt (I \cdot \Omega) = M_{\text{ridge}}(t) + M_{\text{drag}}(t) + M_{\text{load}}(t) + M_{\text{TPW}}(t), \quad (1)$$

где Ω — вектор мгновенной угловой скорости плиты; M_{ridge} — момент от спрединговых толкающих сил (ridge push), распределённых по границам плиты; M_{drag} — вязкий момент на подошве литосферы от мантийного течения; M_{load} — момент, создаваемый несимметричной ледовой нагрузкой (неотектоническая компонента); M_{TPW} — момент от истинного полярного блуждания (влияет на переори-

ентацию плиты относительно оси вращения Земли, но не на относительное движение в мантии — в рамках модели NNR этим членом можно пренебречь, считая TPW уже включённым в M_{drag} через градиент мантийного потока).

Для квазистационарного движения ($d\Omega/dt$ мало, характерное время изменения Ω много больше периода релаксации астеносферы, $\sim 10^6$ лет) левая часть уравнения (1) обращается в ноль, и мы получаем баланс моментов:

$$M_{\text{ridge}} + M_{\text{drag}} + M_{\text{load}} = 0. \quad (2)$$

В приближении, что M_{drag} пропорционален Ω (линейное вязкое сопротивление), можно записать:

$$M_{\text{drag}} = -\gamma \cdot \Omega, \quad (3)$$

где γ — тензор вязкого сопротивления (в изотропном приближении — скаляр). Тогда из (2) и (3):

$$\Omega = (1/\gamma) (M_{\text{ridge}} + M_{\text{load}}). \quad (4)$$

Теперь необходимо выразить M_{load} через параметры ледовой нагрузки. Ледовая нагрузка создаёт на поверхности литосферы вертикальное напряжение $\sigma_{zz} = -\rho_{\text{ice}} g H(x,y)$ (H — мощность льда). Изостатический прогиб литосферы $h_{\text{iso}}(x,y)$ определяется уравнением упругого изгиба пластины на вязком основании. Для длинноволновых компонент ($\lambda > 100$ км) прогиб приближённо равен: $h_{\text{iso}} = -(\rho_{\text{ice}}/\rho_{\text{mantle}}) H$, где $\rho_{\text{mantle}} \approx 3300$ кг/м³. Тогда вертикальное смещение поверхности литосферы создаёт наклон, который приводит к появлению касательных напряжений на подошве литосферы. Через эти касательные напряжения и

интеграл по площади получается момент сил:

$$M_{\text{load}} = \iint (r - r_{\text{CM}}) \times [-v \rho_{\text{ice}} g \nabla h_{\text{iso}}] dS, \quad (5)$$

где v — эффективная вязкость астеносферы (в $\text{м}^2/\text{с}$, после преобразования размерностей — коэффициент пропорциональности между градиентом давления и касательным напряжением). После подстановки $h_{\text{iso}} = -(\rho_{\text{ice}}/\rho_{\text{mantle}}) H$, получаем:

$$M_{\text{load}} = \iint (r - r_{\text{CM}}) \times [v \rho_{\text{ice}} g (\rho_{\text{ice}}/\rho_{\text{mantle}}) \nabla H] dS = (v \rho_{\text{ice}}^2 g / \rho_{\text{mantle}}) \iint (r - r_{\text{CM}}) \times \nabla H dS. \quad (6)$$

Интеграл $\int (r - r_{\text{CM}}) \times \nabla H dS$ по площади плиты может быть преобразован в интеграл от момента инерции ледовой нагрузки. В случае, когда центр масс льда не совпадает с центром масс плиты, этот интеграл отличен от нуля. Для Антарктиды с её характерным смещением центра льда на 320 км, численная оценка даёт:

$$|M_{\text{load}}| \approx (v \rho_{\text{ice}}^2 g / \rho_{\text{mantle}}) * A * \Delta R * (H_{\text{avg}} / L),$$

где $A \approx 14 \times 10^6 \text{ км}^2$ — площадь плиты, $\Delta R = 320 \text{ км}$, $H_{\text{avg}} = 2,1 \text{ км}$, $L = 500 \text{ км}$ (характерный размер градиента). Принимая $v \approx 10^9 \text{ м}^2/\text{с}$ (что соответствует вязкости $10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и плотности $3300 \text{ кг}/\text{м}^3$), получаем $|M_{\text{load}}| \approx 5 \times 10^{25} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Для сравнения: M_{ridge} для Антарктиды оценивается в $(1-2) \times 10^{27} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Таким образом, M_{load} составляет около 2—5% от M_{ridge} , что согласуется с порядком величины, полученным из GPS-данных ($0,003^\circ/\text{млн лет}$ против $\omega = 0,219^\circ/\text{млн лет}$, то есть 1,4%, см. ниже).

3.2. Переход к угловой скорости: вклад неотектоники и дрейфа полюса

Из (4) и (6) получаем выражение для угловой скорости:

$$\Omega = (1/\gamma) M_{\text{ridge}} + (1/\gamma) M_{\text{load}} \equiv \Omega_{\text{ridge}} + \Omega_{\text{load}}. \quad (7)$$

Величина Ω_{load} может быть вычислена численно с использованием современных моделей ледовой нагрузки. Выполнены расчёты по формуле (6) с использованием грида 20×20 км по данным Bedmap2 [15]. Результат: $|\Omega_{\text{load}}| = 0,0031 \pm 0,0005^\circ/\text{млн лет}$, направление — север-северо-запад, близкое к Ω_{ridge} . Отношение $|\Omega_{\text{load}}|/|\Omega_{\text{ridge}}| = 0,014 \pm 0,002$, то есть около 1,4%.

Теперь необходимо добавить эффект дрейфа полюса вращения плиты в системе мантии. В системе отсчёта, где $\Omega = \omega * e$ (e — единичный вектор полюса), изменение $e(t)$ задаётся скоростью дрейфа $v_{\text{pole}} = |de/dt|$. По данным горячих точек [7], $v_{\text{pole}} = 0,09 \pm 0,03^\circ/\text{млн лет}$. Полный вектор угловой скорости как функция времени:

$$\Omega(t) = \omega(t) e_0 + \omega(t) * (v_{\text{pole}} t) \times e_0 + \Omega_{\text{load}}(t), \quad (8)$$

где $\omega(t) = \omega_0 \exp(-t/\tau)$ — затухание угловой скорости, e_0 — начальное направление полюса. Интегрирование (8) по времени даёт угол поворота плиты и смещение любой точки.

3.3. Анализ чувствительности к вязкости и дегляциации

Главный источник неопределённости — вязкость мантии под Восточной Антарктидой, которая по разным данным варьирует от 1×10^{21} до 5×10^{21} Па·с [5, 24]. Это меняет Ω_{load} пропорционально ν (см. (6)), т.е. в 5 раз. Для базового расчёта принято $\nu = 2 \times 10^{21}$ Па·с. При варьировании ν в указанном диапазоне Ω_{load} изменяется от 0,0015 до 0,0075°/млн лет, что на 50 млн лет даёт дополнительный вклад в смещение от ± 30 км до ± 120 км (включено в итоговую неопределённость). Дегляциация (уменьшение H) уменьшает Ω_{load} со временем; в прогнозе на 50 млн лет мощность льда уменьшается линейно до 0,3 км, что снижает Ω_{load} примерно в 7 раз. Этот эффект учтён в численном интегрировании.

ГЛАВА 4. УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ: РЕТРОСПЕКТИВА, ПРОГНОЗ И АСИММЕТРИЯ

4.1. Методология двунаправленного моделирования

Для исследования на интервале от -50 млн лет (50 млн лет назад) до $+50$ млн лет (50 млн лет вперёд) использованы следующие положения:

Уравнения движения (1) — (8) из главы 3 симметричны относительно направления времени при замене знака момента сил, но из-за необратимости дегляциации и диссипации в мантии решение не является строго симметричным. Для ретроспективного расчёта знак времени изменён на противоположный, а мощность льда задана по палеоклиматическим реконструкциям.

Параметры: $\omega(t)$ по экспоненциальному закону с $\tau=78$ млн лет; дрейф полюса $v_{\text{pole}} = 0,09^\circ/\text{млн лет}$ постоянный; вклад неотектоники $\Omega_{\text{load}}(t)$ меняется пропорционально средней мощности льда $H(t)$, которая для прошлого восста-

новлена по данным об изменении уровня моря и изотопов кислорода [51]: 50 млн лет назад — ледниковый щит отсутствовал ($H \approx 0$), 34 млн лет назад — начало формирования, современная мощность 2,1 км.

Для ретроспективного расчёта также учтено, что полюс вращения плиты в прошлом дрейфовал; начальное положение полюса 50 млн лет назад восстановлено обратным дрейфом.

4.2. Ретроспективная верификация: интервал 0—50 млн лет назад

Расчётное положение центра масс Антарктиды для моментов 10, 20, 30, 40 и 50 млн лет назад сравнивалось с палеомагнитными данными (28 точек, сгруппированных в 5 временных срезов). Модельные значения получены с точностью $\pm 0,2^\circ$.

Для времени 10 млн лет назад палеомагнитная широта составляет $72,8^\circ$ ю.ш. с погрешностью $\pm 3,5^\circ$, модельная — $72,6^\circ$ ю.ш., расхождение $0,2^\circ$. Для 20 млн лет назад: $70,1 \pm 4,0^\circ$ и $70,6^\circ$ (расхождение $0,5^\circ$). Для 30 млн лет назад: $67,5 \pm 4,2^\circ$ и $68,0^\circ$ ($0,5^\circ$). Для 40 млн лет назад: $64,9 \pm 4,5^\circ$ и $65,4^\circ$ ($0,5^\circ$). Для 50 млн лет назад: $62,6 \pm 5,0^\circ$ и $63,1^\circ$ ($0,5^\circ$). Среднеквадратичное расхождение по широте — $0,46^\circ$ (≈ 51 км), что лежит в пределах погрешности палеомагнитных определений ($\pm 3—5^\circ$). Без учёта дрейфа полюса ($v_{pole}=0$)

расхождение составило бы $1,3^\circ$, с постоянной угловой скоростью — $2,1^\circ$. Таким образом, модель ПВС с дрейфом полюса успешно верифицирована на всём 50-миллионном интервале.

4.3. Прогноз на 50 млн лет вперёд (детерминированный и вероятностный)

Прогноз выполнен методом Монте-Карло (1000 реализаций) с варьированием следующих параметров (равномерное распределение): начальная угловая скорость ω_0 в диапазоне $0,212 — 0,226^\circ/\text{млн лет}$; постоянная затухания τ в $66 — 90$ млн лет; скорость дрейфа полюса v_{pole} в $0,06 — 0,12^\circ/\text{млн лет}$; вязкость ν в $1 \times 10^{21} — 5 \times 10^{21}$ Па·с; мощность льда через 50 млн лет в $0,2 — 0,5$ км.

Результаты (медианы и 90%-й интервал): смещение центра масс — 720 км (90% доверительный интервал: 620—820 км); азимут — 341° (северо-северо-запад); изменение широты центра масс — $6,5^\circ$ (с $75,5^\circ$ ю.ш. до $69,0^\circ$ ю.ш.); изменение долготы — $+8,5^\circ$ (с 120° в.д. до $128,5^\circ$ в.д.); положение Антарктического полуострова — $57,1^\circ$ ю.ш. (интервал $55,5—58,7^\circ$). Сравнение с прогнозом без учёта дрейфа полюса (только Ω_{ridge} + затухание) даёт смещение 640 км, т.е. вклад дрейфа полюса составляет +80 км (около 12,5%).

4.4. Асимметрия геодинамического режима на интервале ± 50 млн лет

Сравнение эволюции ключевых параметров в прошлом (от -50 до 0) и будущем (от 0 до $+50$) выявляет следующую асимметрию.

Угловая скорость ω (t): за 50 млн лет до настоящего ω уменьшилась с $0,34$ до $0,219^\circ/\text{млн лет}$ (падение на 36%). За 50 млн лет вперёд ω уменьшится с $0,219$ до $0,168^\circ/\text{млн лет}$ (падение на 23%). Причина — нелинейный экспоненциальный закон: скорость убывания пропорциональна текущему значению, поэтому в прошлом, когда ω была выше, абсолютное падение было больше.

Вклад неотектоники $\Omega_{\text{load}}/\Omega_{\text{ridge}}$: 50 млн лет назад ледникового щита практически не было ($H \approx 0$), поэтому $\Omega_{\text{load}} \approx 0$. В современную эпоху $\Omega_{\text{load}}/\Omega_{\text{ridge}} = 1,4\%$. Через 50 млн лет, при $H \approx 0,3$ км, это отношение уменьшится до $\approx 0,2\%$. Таким образом, неотектонический вклад был нулевым, достиг максимума в настоящем и снова упадёт в будущем.

Положение полюса вращения: за 50 млн лет до настоящего полюс дрейфовал в направлении, обратном современному (азимут 132°), сместившись примерно на $4,5^\circ$. В будущем он продолжит дрейф в том же направлении (азимут 312°), также на $4,5^\circ$. Симметрия дрейфа полюса относительно настоящего

го времени соблюдается, так как скорость дрейфа принята постоянной.

Итог: режим не является симметричным из-за эволюции ледовой нагрузки и экспоненциального затухания ω . Прошрое характеризовалось быстрым уменьшением угловой скорости и нарастанием неотектонического вклада, будущее — более плавным уменьшением и затуханием этого вклада. Количественно асимметрия может быть выражена отношением падения ω в прошлом и будущем: $(0,34—0,219) / (0,219—0,168) = 0,121/0,051 \approx 2,37$. То есть падение в прошлом было в 2,4 раза круче.

4.5. Климатические и гляциологические следствия на интервале ± 50 млн лет

В прошлом, 50 млн лет назад, Антарктида находилась на широтах $62—63^\circ$ ю.ш., ледниковый щит отсутствовал, континент был покрыт умеренными лесами (данные палинологии). Смещение к полюсу и похолодание привели к оледенению около 34 млн лет назад. В будущем, через 50 млн лет, северные части континента вернутся на широты, сходные с широтами 50-миллионнолетней давности, но климатическая система будет иной из-за более высокого содержания CO_2 (прогнозируемого). Это вызовет деградацию щита, но не его полное исчезновение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлена новая интегральная модель движения Антарктической литосферной плиты, объединяющая неотектонику (гляциоизостазию) и долгопериодный дрейф с явным учётом дрейфа полюса вращения. Углублённый анализ на симметричном интервале ± 50 млн лет позволил:

Верифицировать модель на ретроспективном отрезке 50 млн лет: расхождение с палеомагнитными данными составляет $0,46^\circ (\approx 50 \text{ км})$ — в пределах погрешности палеомагнитных определений.

Выполнить вероятностный прогноз на 50 млн лет вперёд: смещение центра масс $720 \pm 100 \text{ км}$ (азимут 341°), Антарктический полуостров выходит на широты $56\text{—}58^\circ$ ю.ш., что запускает необратимую деградацию ледникового щита (потеря $35\text{—}45\%$ объёма).

Выявить асимметрию геодинамического режима: в прошлом угловая скорость уменьшалась быстрее (на 36% за 50 млн лет), а неотектонический вклад нарастал; в будущем уменьшение более плавное (23%), а вклад неотектоники упадёт.

Показать, что учёт дрейфа полюса увеличивает прогнозное смещение на $12,5\%$ по сравнению с экстраполяцией постоянной угловой скорости.

Рекомендации: расширение сети GNSS в Восточной Антарктиде; бурение скважин в районе гор Гамбурцева для уточнения дегляциации; совместное моделирование конвекции и ледниковой нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wilson T.J. et al. (2021). The POLENET Project. *Eos*, 102. [2] Argus D.F., Peltier W.R., Drummond R. (2014). ICE-6G_C. *JGR Solid Earth*, 119, 4949—4969. [3] Ivins E.R., James T.S. (2005). Antarctic GIA. *Geophys. J. Int.*, 161, 117—146. [4] Whitehouse P.L., Bentley M.J., Le Brocq A.M. (2012). A new GIA model. *Quat. Sci. Rev.*, 32, 1—15. [5] Whitehouse P.L. et al. (2019). Viscosity of Antarctic mantle. *EPSL*, 506, 100—113. [6] DeMets C., Merkouriev S. (2016). NNR-MORVEL56. *Geophys. J. Int.*, 207, 896—916. [7] Steinberger B., Torsvik T.H. (2010). True polar wander and plate motion. *EPSL*, 296, 495—502. [8] Torsvik T.H. et al. (2012). Phanerozoic polar wander. *Gondwana Res.*, 21, 3—26. [9] Scotese C.R. (2021). PALEOMAP Project. Technical Report. [10] Müller R.D. et al. (2018). Global plate model with deformation. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 19, 2598—2625. [11] Seton M. et al. (2012). Global plate reconstructions. *Earth-Sci. Rev.*, 113, 212—270. [12] van de Berg W.J. et al. (2016). Antarctic temperature and melt. *Clim. Past*, 12, 15—29. [13] Reading A.M. (2006). Seismicity of Antarctica. *Tectonophysics*, 420, 399—417. [14] Dalziel I.W.D. (2020). Antarctica and supercycle. *GSA Today*, 30, 4—11. [15] Fretwell P. et al. (2013). Bedmap2. *The Cryosphere*, 7, 375—393. [16] Mouginot J., Rignot E., Scheuchl B. (2019). Ice velocity. *GRL*, 46, 10226

—10235. [17] Wahr J. et al. (2015). GPS and GIA separation. *JGR*, 120, 679—698. [18] King M.A. et al. (2020). Antarctic crustal velocities. *GRL*, 47, e2020GL088947. [19] Rignot E. et al. (2019). Mass balance. *Nature*, 570, 326—330. [20] Martín-Español A. et al. (2020). GIA models intercomparison. *The Cryosphere*, 14, 3073—3090. [21] Conrad C.P., Lithgow-Bertelloni C. (2004). Plate-motion forces. *Geophys. J. Int.*, 159, 1027—1045. [22] Ghosh A., Holt W.E. (2012). Plate motions and mantle flow. *Geology*, 40, 635—638. [23] van der Wal W. et al. (2015). Viscosity from GIA. *Geophys. J. Int.*, 202, 205—221. [24] Nield G.A. et al. (2018). GPS-derived uplift. *JGR*, 123, 4799—4820. [25] Shepherd A. et al. (2018). IMBIE. *Nature*, 556, 219—222. [26] Larter R.D. et al. (2019). Tectonics of Antarctic Peninsula. *Geology*, 47, 543—547. [27] Granot R., Dymant J. (2018). Gakkel ridge. *Nat. Geosci.*, 11, 836—841. [28] Paxman G.J.G. et al. (2019). Lithosphere of Antarctica. *JGR*, 124, 2970—2993. [29] Shen W. et al. (2020). Mantle flow under Antarctica. *GRL*, 47, e2019GL086985. [30] Torsvik T.H., Cocks L.R.M. (2017). *Earth history*. Cambridge Univ. Press. [31] Müller R.D. et al. (2019). New global plate model. *GSA Today*, 29, 4—9. [32] van der Wal W., Whitehouse P.L. (2020). GIA and viscosity. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 48, 145—169. [33] Peltier W.R. (2004). Global glacial isostasy. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 111—149. [34] Steinberger B. (2000). Plumes in a convecting mantle. *Geophys. J. Int.*, 141, 783—802. [35] Lithgow-Bertelloni C., Richards M.A. (1998).

Cenozoic plate motions. *Rev. Geophys.*, 36, 27—78. [36] Cande S.C., Stock J.M. (2004). Pacific—Antarctic plate motion. *JGR*, 109, B03406. [37] Royer J.Y., Gordon R.G. (1997). Motion of Antarctica. *Geophys. J. Int.*, 128, 405—416. [38] Veeger M. et al. (2021). PALEOMAGIA database. *Geophys. J. Int.*, 226, 1120—1145. [39] Konfal S.A. et al. (2021). Seismicity of Transantarctic Mountains. *Seismol. Res. Lett.*, 92, 156—170. [40] Jordan T.A. et al. (2020). Gamburtsev Mountains. *Nature*, 588, 245—249. [41] Fausto R.S. et al. (2018). Surface mass balance. *J. Glaciol.*, 64, 829—842. [42] Bamber J.L. et al. (2018). Ice sheet thickness. *GRL*, 45, 768—776. [43] Rignot E. et al. (2020). Ice loss. *Science*, 369, 1237—1241. [44] Mouginot J. et al. (2021). Glacier velocity. *Nat. Geosci.*, 14, 456—462. [45] Harwood D.M., Webb P.N. (2019). Cenozoic ice sheet. *Geology*, 47, 901—905. [46] Oerlemans J. (2020). Energy balance model. *J. Climate*, 33, 741—755. [47] DeConto R.M., Pollard D. (2016). Antarctic ice sheet retreat. *Nature*, 531, 591—597. [48] Ritz C. et al. (2015). Sea-level rise. *Nature*, 528, 115—118. [49] Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R.E. (2008). Early Cenozoic greenhouse. *Nature*, 451, 279—283.

НЕОТЕКТОНИКА И ДРЕЙФ ГРЕНЛАНДИИ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЁТОМ ДРЕЙФА ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ И УГЛУБЛЁННЫЙ АНАЛИЗ НА ИНТЕРВАЛЕ ± 50 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

АННОТАЦИЯ

Монография посвящена синтезу новейших (неотектонических) движений земной коры Гренландии, обусловленных гляциоизостатическими эффектами, и долгопериодного дрейфа литосферной плиты. Предложена количественная модель «полярно-вязкостной связки» (ПВС) применительно к Гренландскому кратону, в которой несимметричная ледовая нагрузка создаёт дополнительный момент сил, модулирующий угловую скорость вращения Северо-Американской плиты, частью которой является остров. Впервые в явном виде введён дрейф полюса вращения плиты относительно мантии как самостоятельный параметр, изменяющий про-

гноз на 10—15%. Выполнено углублённое исследование на симметричном интервале ± 50 млн лет (50 млн лет в прошлое и 50 млн лет в будущее) с использованием единого набора уравнений. Ретроспективная часть верифицирована по палеомагнитным данным и реконструкциям Северной Атлантики (расхождение $0,56^\circ$ по широте для интервала 50—0 млн лет). Прогноз вперёд на 50 млн лет, полученный методом Монте-Карло (1000 реализаций), даёт смещение центра масс Гренландии на 410 ± 65 км в северо-западном направлении (азимут 328°), что выводит южную оконечность острова (современное положение на широте 60° с.ш.) на широты $63\text{—}64^\circ$ с.ш. и запускает необратимую деградацию ледникового щита (потеря 50—60% объёма). Показано, что геодинамический режим Гренландии в интервале $-50\dots+50$ млн лет асимметричен: в прошлом доминировал распад Северной Атлантики и активный дрейф на северо-запад, в будущем ожидается более плавное движение и затухание неотектонического вклада.

Ключевые слова: Гренландия, неотектоника, дрейф континентов, гляциоизостазия, ледниковый щит, Северо-Американская плита, полярно-вязкостная связка, прогноз на 50 млн лет, ретроспективный анализ, интервал ± 50 млн лет.

ВВЕДЕНИЕ

Гренландия — крупнейший остров Земли, уникальное геодинамическое образование, чья современная тектоническая активность определяется сложным взаимодействием трёх разнородных процессов: быстрых вертикальных гляцио-изостатических движений (скорости подъёма до 15 мм/год в краевых зонах), медленного горизонтального дрейфа Северо-Американской литосферной плиты ($\approx 2,3$ см/год на северо-запад) и дрейфа самого полюса вращения плиты относительно мантии, вызванного перестройкой конвективных течений в нижней мантии. Как отмечают исследователи, на гренландскую кору воздействуют три мощные геологические силы: движение тектонических плит, ослабление давления на коренные породы по мере таяния ледников и изостатическая корректировка, продолжающаяся с последнего ледникового периода [8, 10].

В отличие от Антарктиды, где плита окружена срединно-океаническими хребтами, Гренландия является составной частью Северо-Американской плиты и её движение подчинено глобальной кинематике этой крупной плиты. Гренландия соединена с Северной Америкой через пролив Нэрса, который, как показывают исследования, не является простой трансформной границей, а представляет собой диффузную зону косого сдвига [7, 18]. Кроме того, Гренландия при-

мыкает к активному вулканическому региону Исландии, а под юго-восточной частью острова фиксируется влияние горячей точки [3, 14]. Исландский плюм создаёт аномально низкую вязкость мантии в этом районе, что существенно влияет на гляциоизостатические процессы и скорость вертикальных движений коры.

Ключевой прорыв в понимании современной геодинамики Гренландии — создание сети GNET (Greenland GNSS Network), состоящей из 58 станций, непрерывно отслеживающих горизонтальные и вертикальные перемещения коры с 2005 года [5, 12]. С помощью этих данных, а также комбинирования с показаниями тысяч GPS-станций по всей Северной Америке и компьютерным моделированием, охватывающим последние 26 тысяч лет, исследователи смогли разделить влияние тектонических, гляциоизостатических и климатических факторов [8, 9, 11]. Установлено, что Гренландия в целом дрейфует на северо-запад со скоростью примерно 23 мм/год, при этом в разных регионах наблюдаются разнонаправленные деформации — растяжение в одних областях и сжатие в других [5, 11]. В целом площадь острова немного уменьшается, но современное таяние льдов вызывает локальное расширение некоторых регионов [9].

Цель настоящей монографии — на основе данных GNSS, моделей GIA, палеомагнитных реконструкций и численного моделирования построить интегральную модель движения Гренландской части Северо-Американской плиты, объеди-

няющую неотектонические (гляциоизостатические) эффекты с долгопериодным дрейфом и явным учётом дрейфа полюса вращения. Выполнен углублённый анализ на симметричном интервале ± 50 млн лет.

Основные задачи:

- построить единую интегральную модель «полярно-вязкостной связи» для Гренландии;

- выполнить ретроспективный расчёт положения Гренландии на интервале 0—50 млн лет назад и сравнить с палеомагнитными и геологическими данными;

- выполнить прогноз на 50 млн лет вперёд с вероятностной оценкой;

- сравнить эволюцию ключевых параметров (угловая скорость, положение полюса вращения, вклад неотектоники) в прошлом и будущем;

- дать климатическую и гляциологическую интерпретацию полученных результатов.

Методологическая база: GNSS-данные сети GNET [5, 11], модели GIA ICE-6G_C [2] и комбинированные модели [15], кинематические модели NNR-MORVEL56 [1] и ITRF2020 [19], палеомагнитные реконструкции Северной Атлантики [4, 16], реконструкции палеогенового движения Гренландии относительно Северной Америки [17], данные о вязкости мантии [3, 14, 15], численное интегрирование уравнений вращательного движения методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом 0,1 млн лет, ансамблевое моделирование Мон-

те-Карло (1000 реализаций). Код модели и входные данные доступны по запросу у авторов.

Структура монографии: Глава 1 — неотектоническая основа Гренландии (гляциоизостазия, сеть GNET, активные деформации). Глава 2 — кинематика дрейфа Гренландской части Северо-Американской плиты: палеомагнитные реконструкции, современные GNSS, дрейф полюса. Глава 3 — интегральная модель ПВС (полный вывод уравнений с учётом специфики Гренландии). Глава 4 — углублённый анализ на интервале ± 50 млн лет: ретроспектива, прогноз, асимметрия. Заключение — основные результаты и рекомендации.

ГЛАВА 1. НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОСНОВА ГРЕНЛАНДИИ: ГЛЯЦИОИЗОСТАЗИЯ, СЕТЬ GNET И АКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Структура ледникового щита и его влияние на кору

Гренландский ледниковый щит (GrIS) является вторым по величине ледниковым массивом на Земле после Антарктического, его средняя мощность составляет около 1,6 км, максимальная достигает 3,2 км в центральной части острова. Масса ледникового щита создаёт значительную вертикальную нагрузку на земную кору — порядка 5—7 МПа в центральных районах. Под действием этой нагрузки кора прогнута, а астеносферный материал вытеснен в стороны.

Современное таяние ледников (наблюдаемое ускоренными темпами в последние десятилетия) приводит к двум противоположным эффектам в разных частях острова [8, 9, 12]. С одной стороны, разгрузка давления на коренные породы вызывает локальное поднятие и расширение коры. «Лед, который таял в последние десятилетия, вытолкнул Гренландию

наружу и вызвал поднятие, так что площадь фактически увеличилась за этот период», — отмечает ведущий исследователь Датского технического университета [8]. С другой стороны, более долгосрочный процесс изостатической коррекции, связанный с таянием гигантских ледяных масс со времени пика последнего ледникового периода (~20 тыс. лет назад), вызывает подъём и сжатие других участков [10, 13].

1.2. Данные сети GNET: вертикальные скорости и их интерпретация

Сеть GNET была развёрнута вокруг Гренландии с 1995 года и включает 58 непрерывных GNSS-станций на коренных породах [5, 11]. Эти станции регистрируют как вертикальные, так и горизонтальные перемещения с точностью до 0,5 мм/год. Данные GNET позволили получить наиболее точную на сегодняшний день картину вертикальных движений по всему острову [12].

Анализ вертикальных скоростей, полученных в ходе исследований, показывает, что все GPS-станции на Гренландии демонстрируют тенденцию к подъёму, причём станции в южной части Гренландии имеют более высокую вертикальную скорость [2, 15]. По модели GIA и данным GRACE установлено, что после вычитания влияния гляциоизостазии вертикальные скорости, скорректированные на GIA, хорошо согласуются с вертикальными скоростями, полученными по

данным спутниковой гравиметрии [2, 15].

Амплитуда вертикальных движений составляет от 2—4 мм/год в центральных районах Восточной Гренландии до 12—15 мм/год в зонах активной дегляциации на юго-западном и юго-восточном побережьях. Наиболее высокие скорости подъёма зафиксированы в районах, где ледниковый щит наиболее интенсивно теряет массу. Исследователи показали, что при исключении упругой деформации с высокоразрешающими сетками изменения массы, оценки вертикальных скоростей GNSS согласуются с моделями GIA, хотя остаются значительные региональные расхождения [5, 15].

1.3. Асимметрия Восток—Запад и роль Исландского плюма

Важной особенностью неотектоники Гренландии является резкая асимметрия между восточной и западной частями острова, а также между южной и центральной. Эта асимметрия обусловлена двумя основными факторами:

Разной мощностью литосферы. На западе, в области Канадского щита, литосфера достигает мощности 180—220 км, на востоке, в зоне влияния рифтогенеса Северной Атлантики, она утонена до 80—100 км.

Влиянием Исландского плюма. Под юго-восточной Гренландией фиксируется зона аномально низкой сейсмической скорости и высокой температуры мантии, связанная с го-

рячей точкой Исландии. Согласно данным высокоразрешающей термальной томографии, вариации вязкости верхней мантии под Гренландией достигают трёх порядков величины [3, 14]. В юго-восточном секторе, где горячая точка Исландии оказывает прямое воздействие, вязкость снижается до $\sim 5 \times 10^{18}$ Па·с, что в 100 раз ниже, чем под центральным кратоном ($\eta \approx 5 \times 10^{20}$ Па·с). В районе пролива Нэрса и северной Гренландии вязкость повышается до $\sim 2 \times 10^{21}$ Па·с [15].

Аномально низкая вязкость под юго-восточной Гренландией вызывает быстрое вертикальное поднятие коры в ответ на дегляциацию. Как отмечают исследователи, тёплая верхняя мантия с низкой вязкостью заставляет твёрдую Землю «отскакивать» намного быстрее от дегляциации [3, 14]. Это имеет прямое следствие для прогнозов: вертикальные движения в этом регионе будут доминировать над горизонтальными в ближайшие 10—20 тыс. лет.

1.4. Горизонтальные деформации: растяжение и сжатие

Современные исследования впервые описали горизонтальные движения в такой детализации [5, 11, 12]. Были созданы модели, охватывающие период от $\sim 26\,000$ лет назад до настоящего времени, и использованы точные измерения последних 20 лет, что позволило очень точно измерить текущие движения [12]. «Ранее предполагалось, что Гренландия

в основном растягивается из-за динамики, вызванной таянием льда в последние годы, но к нашему удивлению, мы также обнаружили обширные зоны, где Гренландия сжимается из-за этих движений», — говорит Лонгфорс Берг [12].

Обнаружены следующие закономерности в горизонтальных движениях [5, 11]:

Преобладающее смещение на северо-запад всей плиты со скоростью ~ 23 мм/год (2,3 см/год), что соответствует дрейфу Северо-Американской плиты в системе NNR.

Зоны растяжения (экстензии) на юго-восточном и юго-западном побережьях, связанные с современным таянием льда и разгрузкой давления на кору.

Зоны сжатия (конвергенции) в центральной и северной части, вызванные долгосрочной изостатической реакцией коры на послеледниковое восстановление.

1.5. Проблема разделения тектонического и гляциоизостатического сигналов

Ключевая методическая проблема исследования Гренландии та же, что и для Антарктиды: в данных GNSS сигналы от дрейфа плиты, гляциоизостазии и современной потери массы льда перекрываются. Однако в отличие от Антарктиды, где плита окружена спрединговыми центрами, Гренландия движется как часть Северо-Американской плиты, чьи пара-

метры вращения известны с высокой точностью.

Команда под руководством Лонгфорс Берг [11] использовала оригинальный подход: из скоростей станций GNET вычиталась предсказанная скорость вращения Северо-Американской плиты (относительно полюса вращения, расположенного в районе экватора и западного полушария), и остаточные движения были проанализированы с помощью модели, включающей GIA и упругую реакцию на современную потерю массы. Это позволило количественно оценить вклад неотектонического компонента в горизонтальные движения. Для вертикальных движений разделение было выполнено с помощью совместной обработки данных GPS, GRACE и моделей GIA [2, 15].

ГЛАВА 2. КИНЕМАТИКА ДРЕЙФА ГРЕНЛАНДСКОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО- АМЕРИКАНСКОЙ ПЛИТЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ИСТОРИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ И ДРЕЙФ ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ

2.1. Палеомагнитные и геологические реконструкции: распад Северной Атлантики

Гренландия, будучи частью Северо-Американской плиты, прошла сложный путь тектонической эволюции. Реконструкции крейдово-третичной геодинамики Северной Атлантики показывают [16, 17], что от 95 до 80 млн лет назад Северо-Американская, Гренландская и Евразийская плиты двигались совместно на северо-восток. Около 80 млн лет назад произошёл резкий излом траекторий всех трёх плит — они одновременно изменили направление и последовали на северо-запад, причём это движение продолжалось примерно до 20 млн лет назад, когда Евразия отклонилась на севе-

ро-восток, в то время как Гренландия и Северная Америка продолжили движение на северо-запад [16].

Рифтогенез в Лабрадорском море и море Баффина происходил в интервале 90—40 млн лет, что привело к отделению Гренландии от Канады [6]. Гренландия начала дрейфовать на северо-запад от Лабрадора и Баффиновой земли в течение этого 50-миллионного интервала. При этом возникла тектоническая проблема пролива Нэрса — некоторые модели предсказывают левостороннее смещение на 100—250 км, но геологические данные оспаривают наличие единого разлома [7, 18]. Согласно современным представлениям, граница между Гренландией и Канадой в этом регионе является диффузной зоной косого сдвига, а не простой трансформной границей [7, 17].

Таким образом, палеомагнитные данные (доступные для интервала 800—1500 млн лет) и реконструкции на основе морских магнитных аномалий позволяют восстановить траекторию Гренландии: 50 млн лет назад она находилась примерно на широте 60° с.ш., 30 млн лет назад — 62° с.ш., 10 млн лет назад — 65° с.ш., в настоящее время центр масс острова расположен на широте $70,5^{\circ}$ с. ш. Эти данные используются для ретроспективной верификации модели (глава 4).

2.2. Современная кинематика по GNSS и глобальным моделям

Гренландия является неотъемлемой частью Северо-Американской плиты, поэтому её кинематика задаётся параметрами вращения этой плиты в глобальных системах отсчёта. Согласно модели NNR-MORVEL56 [1], полюс вращения Северо-Американской плиты находится в точке $48,7^\circ$ с.ш., $78,2^\circ$ з.д., а угловая скорость составляет $\omega_{\text{NA}} = 0,210 \pm 0,008^\circ/\text{млн лет}$. В других системах (ITRF2020, горячие точки) параметры различаются не более чем на 5—7%.

Линейная скорость центра масс Гренландии (современное положение примерно $70,5^\circ$ с.ш., 40° з.д.) составляет 23 ± 1 мм/год, направление — азимут 325° (северо-запад) [5, 11]. В работе Лонгфорс Берг [11] отмечено, что Гренландия движется на северо-запад в составе Северо-Американской тектонической плиты со скоростью 23 мм/год, при этом станции GNET не движутся с одинаковой скоростью — их перемещения отслеживаются относительно полюса вращения [11].

Важно отметить, что разные исследовательские группы использовали различные подходы к обработке данных. Работа под руководством Лонгфорс Берг [11] объединила данные с 58 GPS-станций в Гренландии, моделирование, измерения с нескольких тысяч станций в Северной Америке и расчёты движений за последние 26 тысяч лет [8]. Другие исследова-

ния использовали данные 225 GPS-участков для оценки кинематических параметров [1, 8].

2.3. Дрейф полюса вращения Гренландской части Северо- Американской плиты

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.