

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

**Шилько Е.В., Псахье С.Г., Димаки А.В., Астафуров С.В.,
Ружич В.В., Гранин Н.Г.**



Введение:

Одним из проявлений процессов деформирования и разрушения в земной коре является сейсмическая активность. Несмотря на достигнутые успехи в понимании механики инициирования землетрясений и закономерностей сейсмического процесса, в том числе их связи с особенностями изменения напряженного состояния блочной геосреды, многие вопросы остаются открытыми.

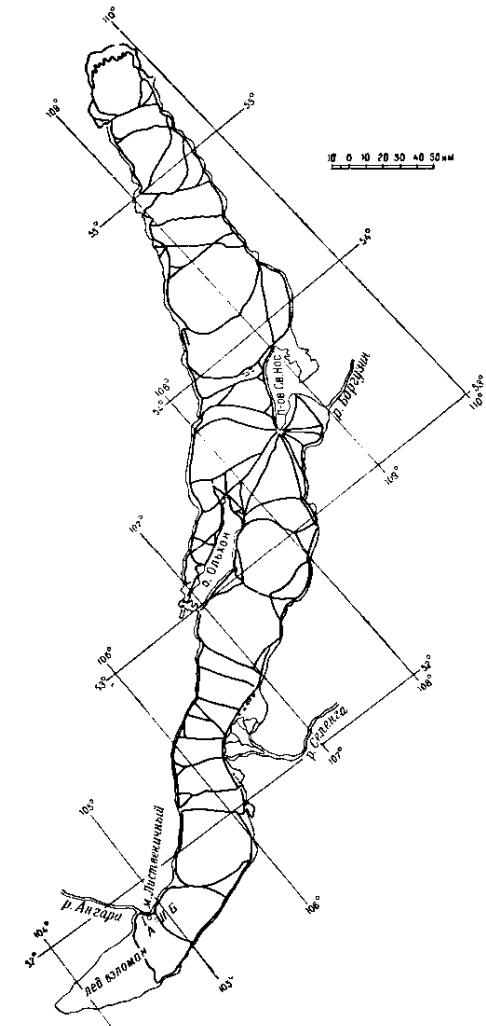
Проводимые исследования показывают, что адекватной модельной средой для комплексного исследования деформационных процессов в земной коре и сопутствующих им сейсмических проявлений является блочный ледовый покров озера Байкал.

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей «сейсмического» режима ледового покрова и его связи с величиной и характером изменения внутренних напряжений.

Отдельное внимание уделено анализу «сейсмических» предвестников крепномасштабных событий, связанных с динамической активизацией надвиговых перемещений на границах раздела крупных структурных фрагментов ледового покрова (в зонах поддвига) .

Факторы, обеспечивающие сходство ледового покрова и литосферы:

1. Блочная структура. Основные блоки (плиты) ледового покрова разделены сквозными трещинами (интерфейсами), которые играют роль, во многом аналогичную границам раздела тектонических плит.
2. Реология льда. На малых временных масштабах лед описывается как упруго-пластический материал, на больших временах (сутки - недели) – как вязкоупругопластический.
3. Наличие температурного градиента в толще льда: от температуры плавления у основания покрова (около 0°C) до относительно низких температур ($-15\ldots-30^{\circ}\text{C}$) на дневной поверхности.
4. Характер изменения реологических свойств среды с глубиной (переход от упругохрупкого отклика в поверхностном слое к вязко-упругому у основания)
5. «Термическая» природа деформационных процессов в ледовых покровах водоемов и литосфере.
6. Важная роль подложки с нулевым (вода) или пониженным (астеносфера) сопротивлением сдвигу.
7. Важное влияние стесненных граничных условий в плоскости залегания, обуславливающее образование и развитие блочной структуры как ледового покрова, так и литосферы.



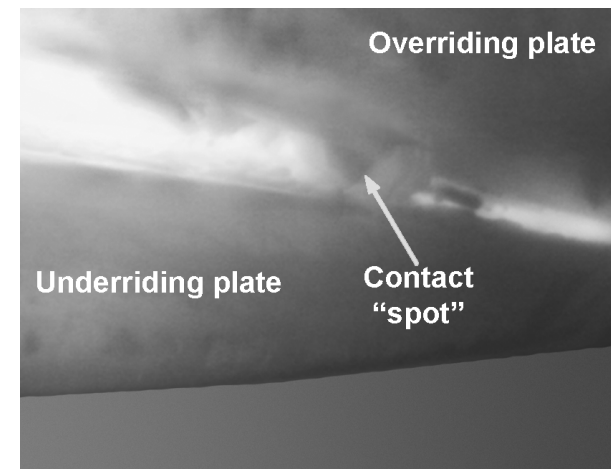
Блочная структура
ледового покрова
озера Байкал
(Сокольников, 1960)

Многие типичные деформационные структуры в ледовом покрове могут рассматриваться как аналоги известных тектонических структур:

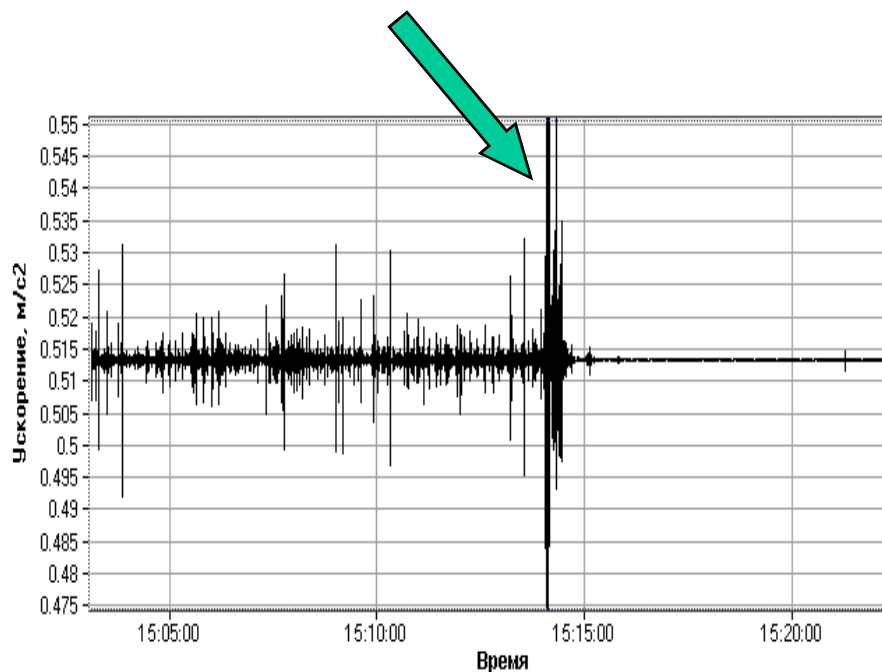
**Конвергентные межплитные границы (зоны поддвига),
в которых происходит «сток» ледового покрова**



Конвергенция плит на таких границах раздела является деформационным механизмом, который контролирует характерную величину внутренних напряжений в системе.



Сейсмическое проявление акта динамической конвергенции ледовых плит



Наиболее высокоамплитудные сейсмические события в ледовом покрове связаны с «актами» динамической конвергенции ледовых плит, вызываемыми разрушением «пятен контакта» на межплитной границе (аналогов участков интерфейса литосферных плит, эволюция которых определяется “rate-weakening friction law”).

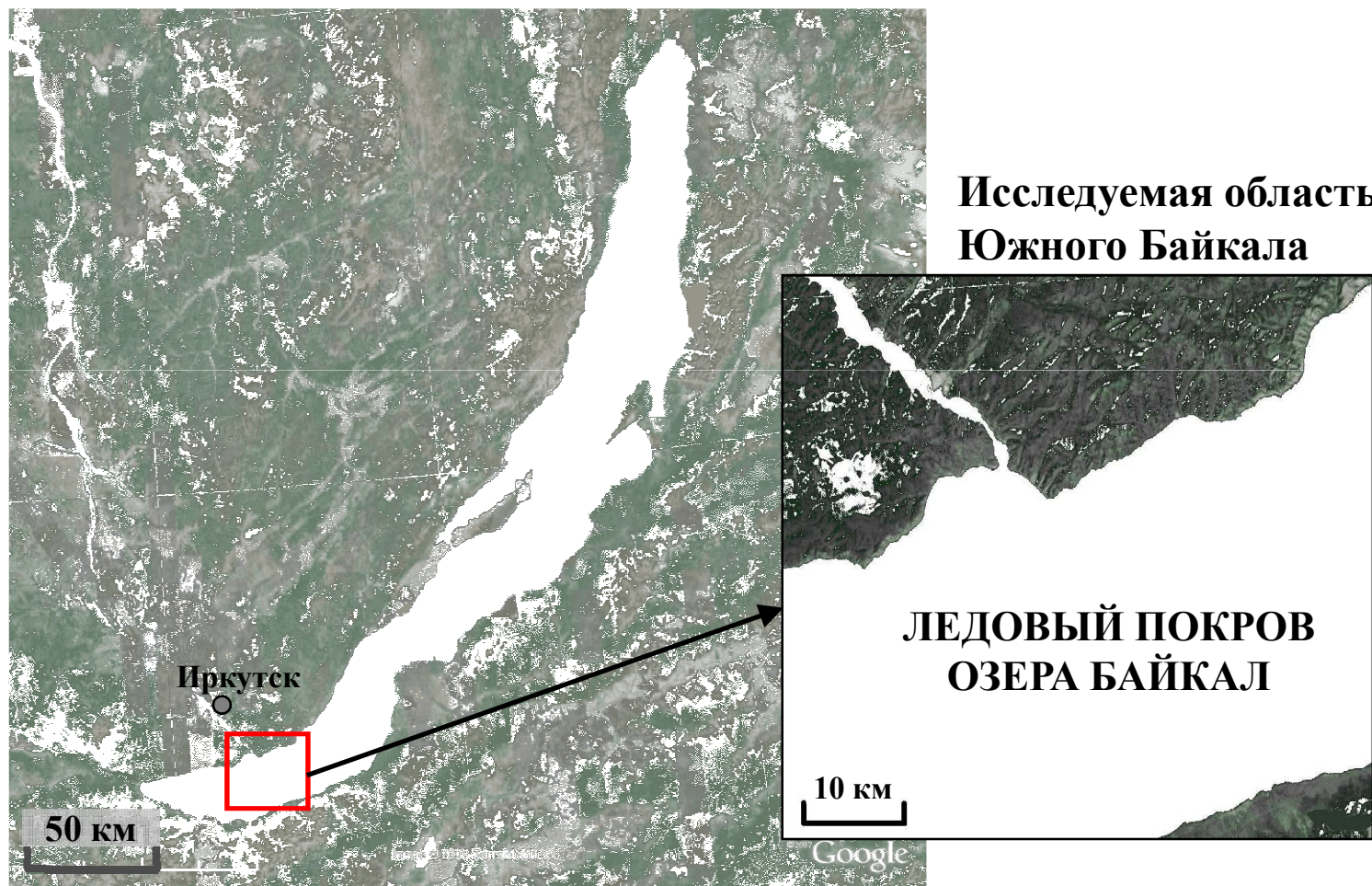
Сейсмическая энергия этих событий составляет:

$$E \sim 10^4 - 10^7 \text{ Дж}$$

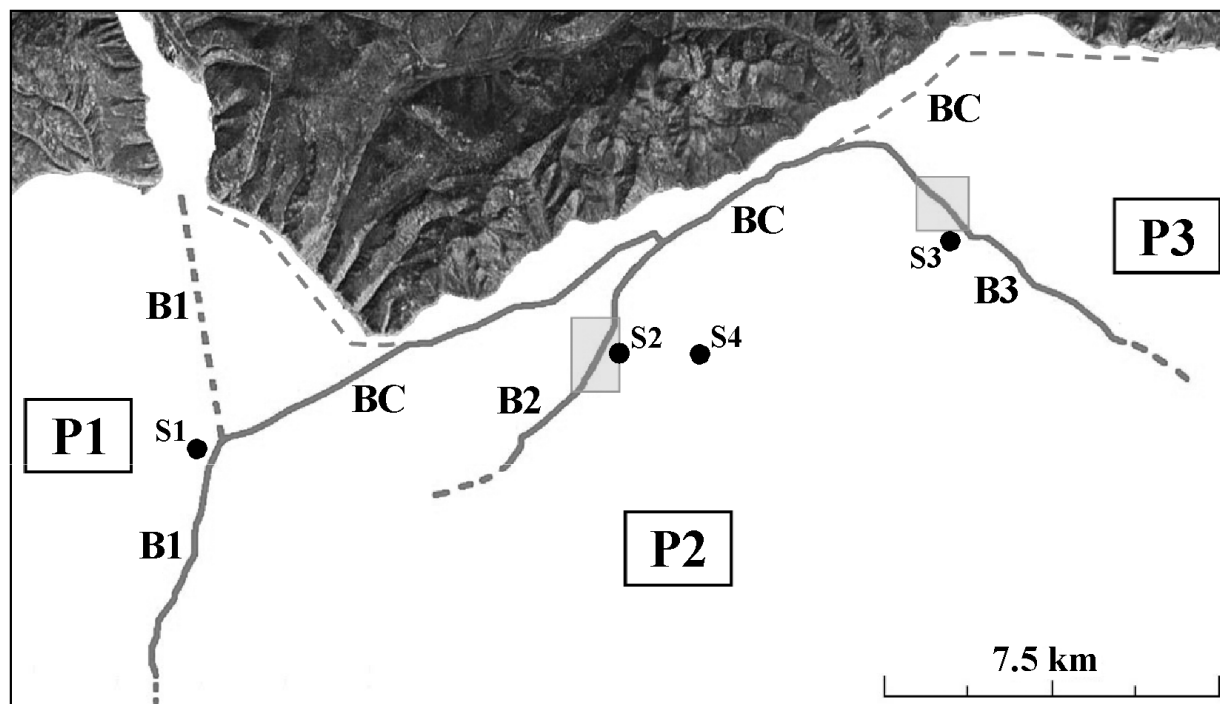
Амплитуда колебаний:

$$A_{seismo} \sim 10^1 - 10^4 \text{ мкм}$$

Основные исследования проводились на зрелом ледовом покрове озера Байкал вблизи юго-западного побережья.



**Фрагментированная структура исследуемой области ледового покрова
в зимний период 2009 года**

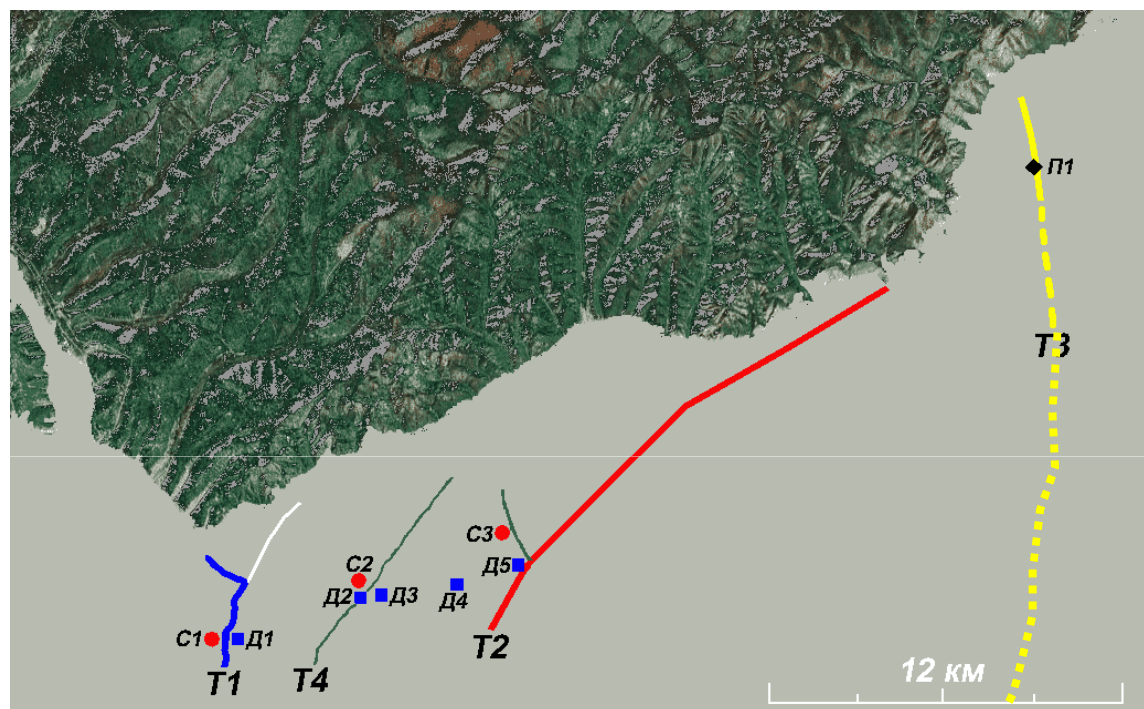


P1, P2, P3 – основные ледовые плиты

B1, B3, BC – конвергентные границы раздела плит (*зоны поддвига*)

B2 – зона поддвига, частично фрагментирующая плиту **P2**

Фрагментированная структура исследуемой области ледового покрова в зимний период 2010 года



T3 – восточная граница крупной ледовой плиты
(зона поддвига)

T1, T2 – «древние» зоны поддвига в высокой степени «залеченности»,
неактивные на протяжении 1-1.5 месяцев

T4 – тонкий аккомодационный разрыв (неактивный)

ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для обеспечения стабильной температуры в процессе работы сейсмоприемники устанавливались в лунках на поверхности льда, примораживались и закрывались от воздействия солнечного света.

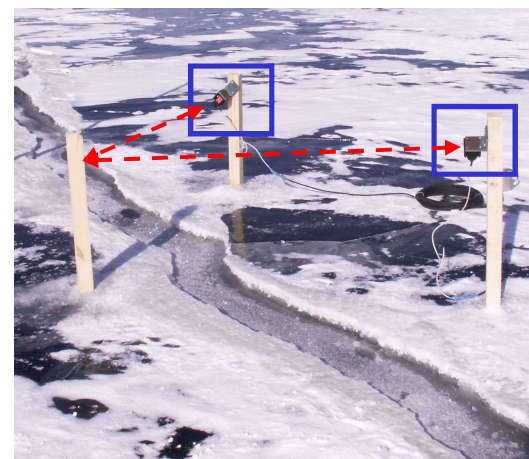
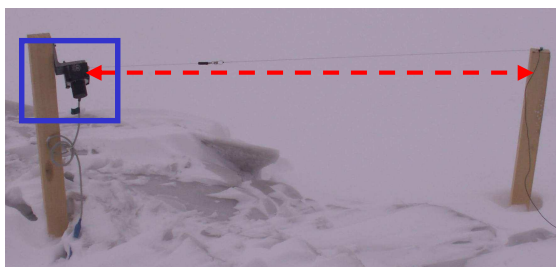


Сейсмоприемники «Геоакустика»
3 направления перемещений;
Полоса частот 0,1...250 Гц;
Динамический диапазон
 $2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \text{ м/сек}^2$

Деформометры Tongda: $\pm 1 \text{ мм}$,
точность: $\pm 1 \text{ мкм}$.

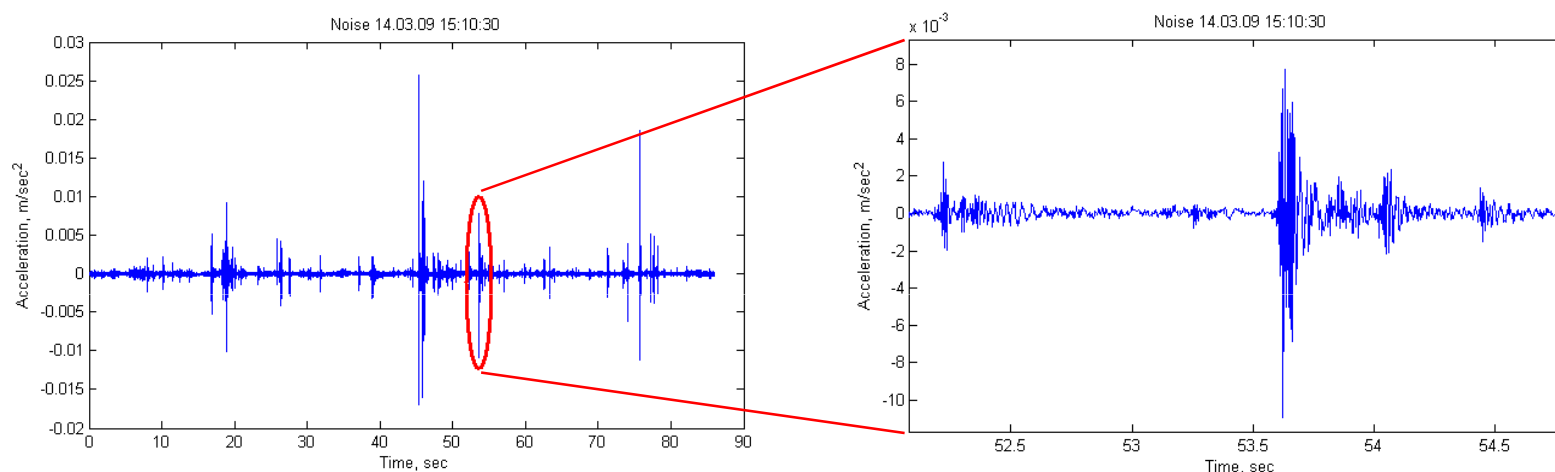


Тросовые датчики
перемещения MicroEpsilon:
0..1 м, $\pm 1 \text{ мм}$; 0..3 м, $\pm 3 \text{ мм}$.



ХАРАКТЕР СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ НА ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ

Типичный сейсмический сигнал, регистрируемый на ледовом покрове, представляет собой последовательность импульсов, амплитуда которых различается на несколько порядков величины.



Событие – отдельный сейсмический импульс, связанный с единичным актом выделения упругой энергии.

Анализ сейсмической активности проводился на основе использования амплитуды ускорений пришедших волн .

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В основу алгоритма выделения сейсмических событий положен известный метод кумулятивных сумм.

Обнаруживаются моменты изменения дисперсии сигнала.

$$S_i^{+j} = \frac{\lambda}{\sigma} \sum_{k=i}^j \left(|y_k - \tilde{y}_k| - \frac{\lambda}{2} \right) \quad \text{- начало события} \qquad S_i^{-j} = \frac{\lambda}{\sigma} \sum_{k=i}^j \left(-|y_k - \tilde{y}_k| + \frac{\lambda}{2} \right) \quad \text{- окончание события}$$

$$g_n^+ = S_1^{+n} - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^{+k} > 0 \qquad g_n^- = S_1^{-n} - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^{-k} > q$$

λ - порог чувствительности алгоритма; $\tilde{y}_k$ - значение сигнала, сглаженное путем усреднения по двум точкам; σ^2 - дисперсия шума сейсмоприемника.

Значения перемещений ледового покрова вычисляются путем двойного интегрирования ускорения.

$$v(t) = \int_{t_{start}}^t (a(t') - \bar{a}) dt', \quad \text{- вычисление скорости} \qquad x(t) = \int_{t_{start}}^t v(t') dt' - (t - t_{start}) \bar{v}, \quad \text{- вычисление перемещения}$$

$$\bar{a} = M\{a(t)\}, \quad t \in (t_{start}; \quad t_{end}). \qquad \bar{v} = M\{v(t)\}, \quad t \in (t_{start}; \quad t_{end}).$$

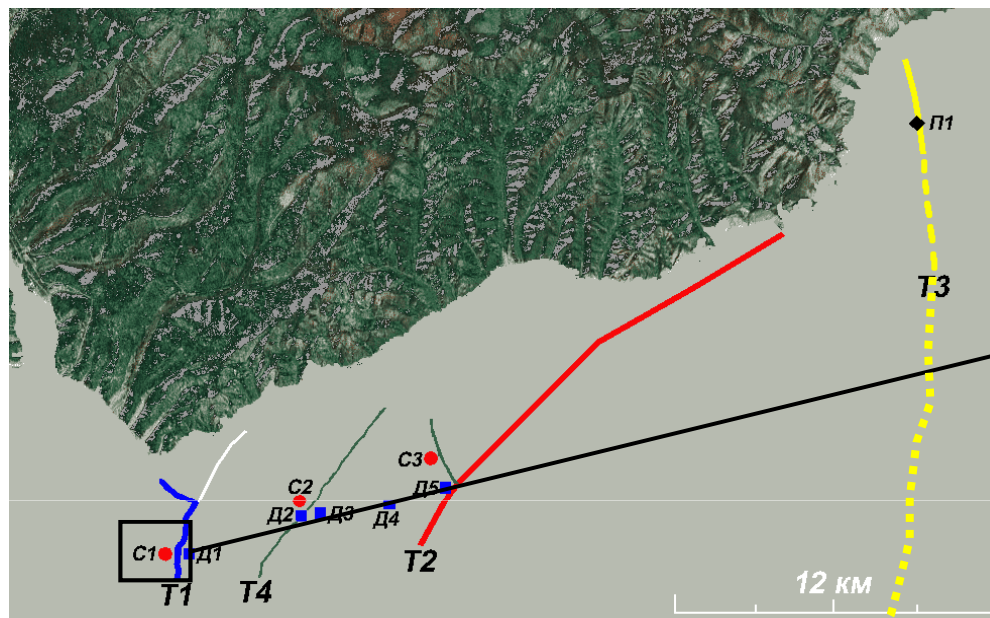
t_{start} и t_{end} – время начала и окончания сейсмического события, $M\{ \}$ – символ операции математического ожидания.

Проведение комплексного мониторинга позволило получить ряд интересных результатов, демонстрирующих характер сейсмической активности и его связь с деформационными процессами в блочной среде.

Основные результаты:

I. Характерная величина внутренних «тектонических» напряжений в ледовом покрове определяет степень «сейсмической» активности. Локальные характеристики «сейсмичности» в значительной степени зависят от величины и знака локальных напряжений.

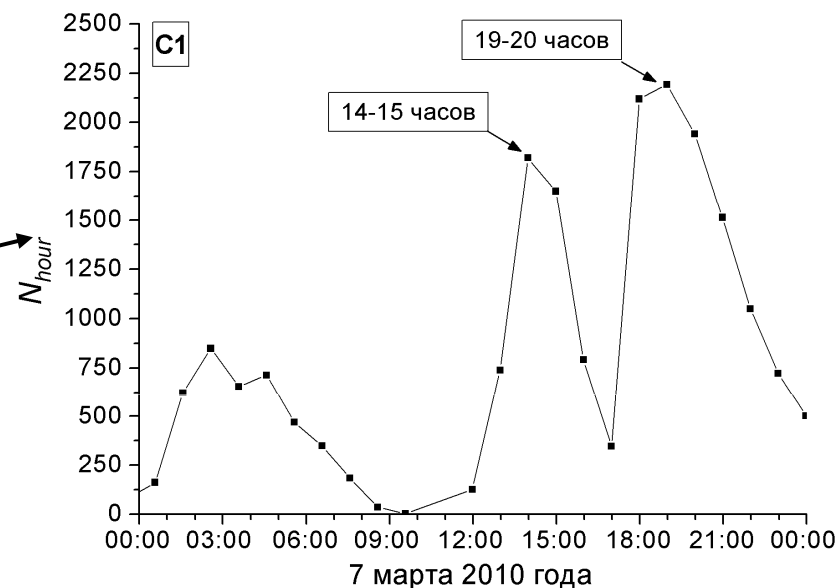
Суточные вариации сейсмической активности ледового покрова



«Сейсмическая» активность демонстрирует выраженную суточную периодичность, характеризующуюся двумя выраженными пиками в послеполуночное время.

Суммарная энергия «сейсмической» активности в вечернее время (вечерний максимум) возрастает на 1-1,5 порядка величины в сравнении с дневной активностью.

Диаграмма распределения числа сейсмособытий за час в течение 7 марта 2010 года



Дневной пик:

мелкие «сейсмособытия»

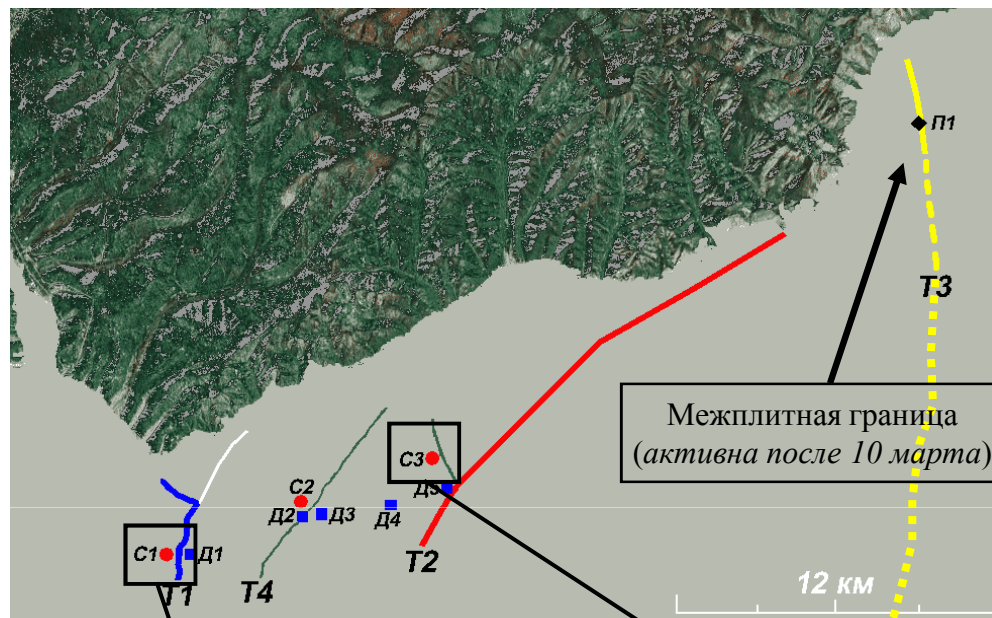
($A_{seismo} < 1$ мкм)

Вечерний пик:

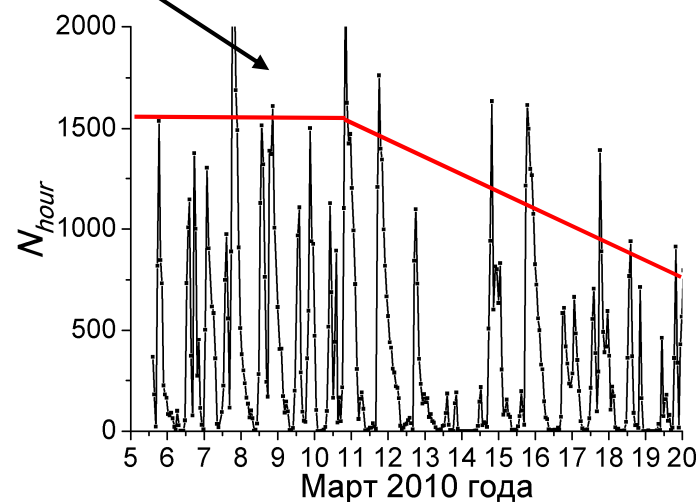
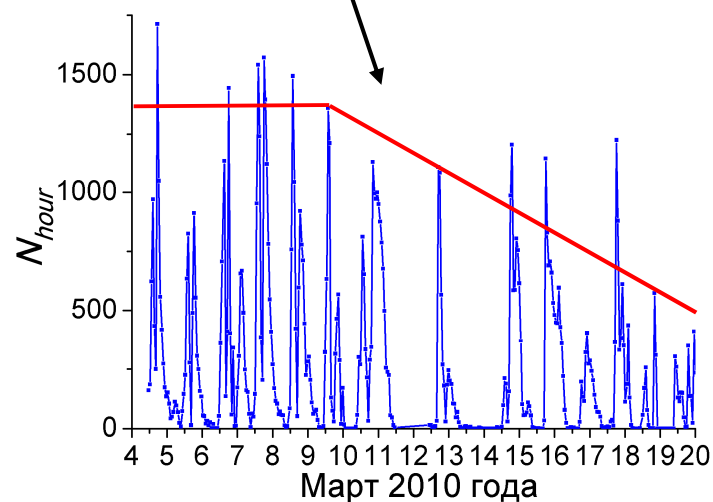
возрастание доли «крупных сейсмособытий» ($A_{seismo} < 1$ мкм) до 1-10%

$A_{seismo} \approx 1$ мкм (BB 15 г R~300-500 м)

О связи сейсмической активности с уровнем и распределением внутренних напряжений в среде



Характерный уровень тектонических напряжений в значительной степени определяет «сейсмическую» активность, то есть интенсивность вовлечения деформационных механизмов низкого ранга, что характерно для всех иерархически организованных сред.

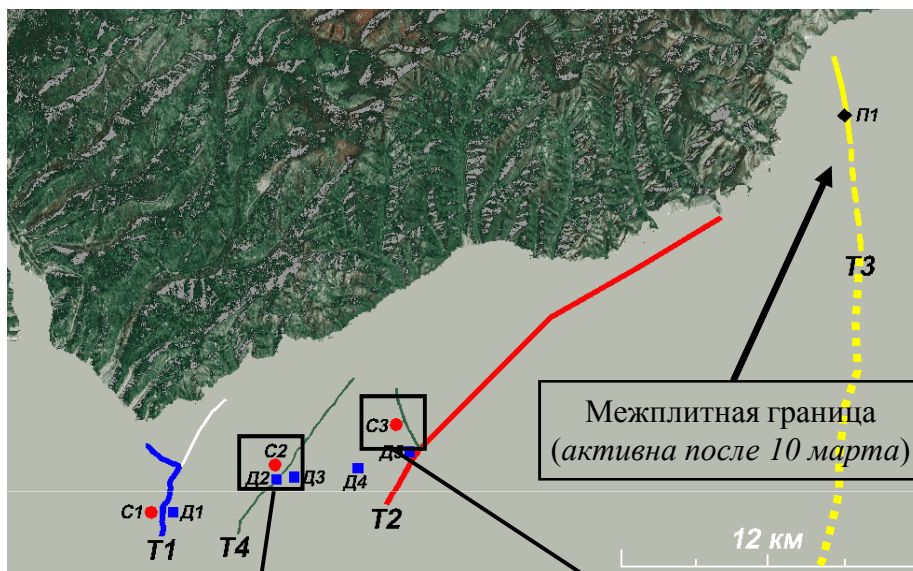


$$N_{C3} \approx 1.3 \cdot N_{C1}$$

$$E_{C3} \approx 1.15 \cdot E_{C1}$$

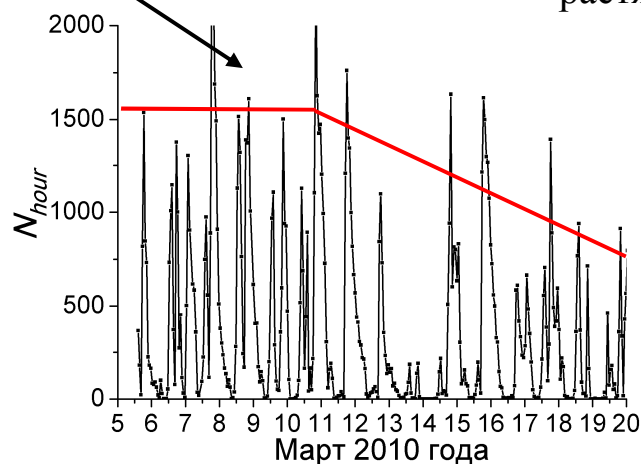
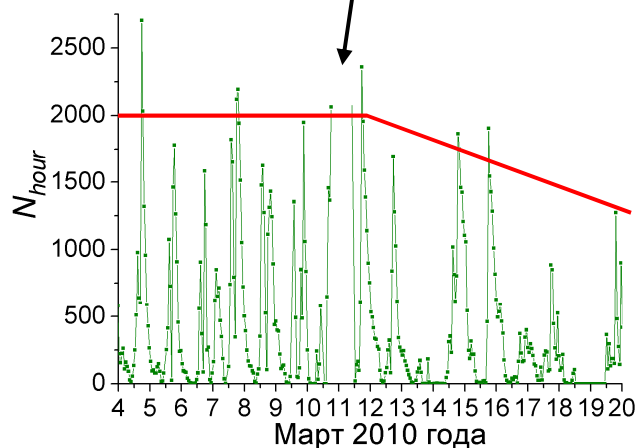
$$E \sim \sum_{i=1}^N (A_{seismo}^i)^2$$

О связи сейсмической активности с уровнем и распределением внутренних напряжений в среде



Суммарная «энергия» событий в зоне действия растягивающих напряжений (С2) ниже, чем в зонах действия сжимающих напряжений (С1 и С3), более чем в 2 раза.

Это связано с малым числом «высокоамплитудных сейсмособытий» ($A_{seismo} \geq 1 \text{ мкм}$) и объясняется низкой прочностью хрупких материалов на растяжение.



$$N_{C2} \approx 1.3 \cdot N_{C3}$$

$$E_{C2} \approx 0.5 \cdot E_{C3}$$

$$E \sim \sum_{i=1}^N (A_{seismo}^i)^2$$

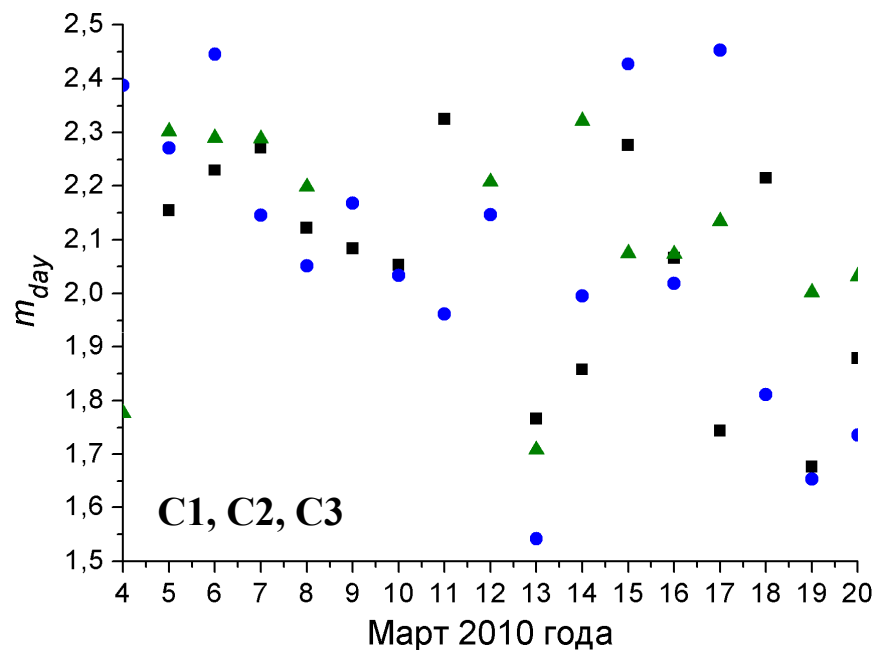
Анализ характера и наклона кривой повторяемости сейсмособытий
(аналога закона Гуттенберга-Рихтера)

Основные результаты:

II. Амплитудное распределение количества «сейсмических» событий аппроксимируется линейной зависимостью с показателем $m \sim 2$. Это соответствует закону повторяемости Гуттенберга-Рихтера с показателем $b \sim 1$ и отвечает нормальному сейсмическому режиму.

Построение и анализ кривой повторяемости «сейсмособытий» в ледовом покрове

Временное распределение показателя m_{day}
(на основе суточных гистограмм)
для различных областей ледовой плиты



«Средневзвешенное» значение m составляет $2,1 \div 2,2$ и отвечает нормальному сейсмическому режиму.

Ледовый покров Байкала является во многих отношениях привлекательным модельным объектом для комплексного изучения закономерностей деформационного и сейсмического процессов в земной коре.

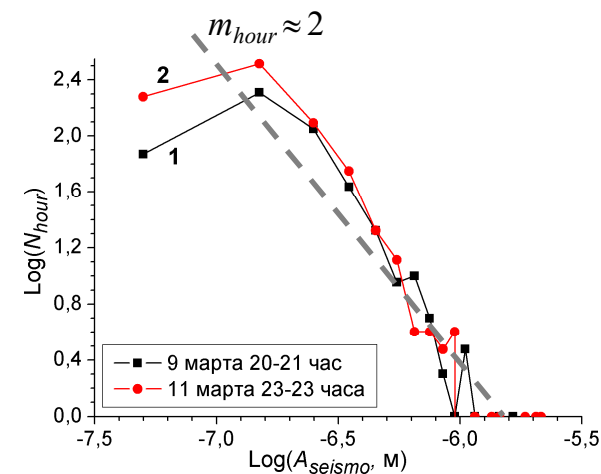
Закон Ишимото-Иида

$$n(A)dA = kA^{-m}dA$$

m – наклон
аппроксимирующей
кривой

$$m = b + 1$$

b – показатель в законе
Гуттенберга-Рихтера

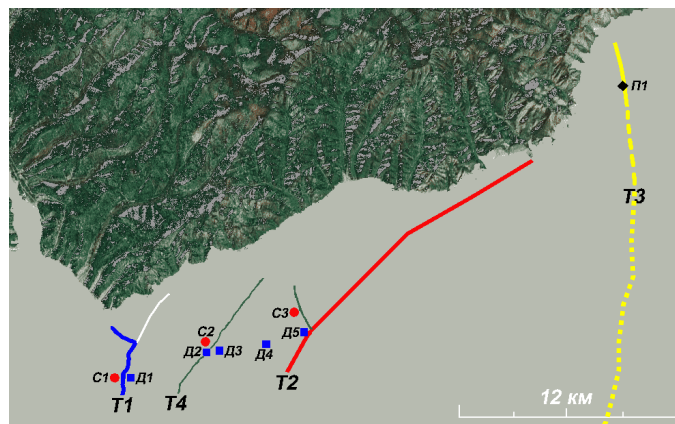


Важной составляющей изучения взаимосвязи сейсмических и деформационных процессов в ледовом покрове и литосфере является анализ процессов подготовки крупномасштабных динамических явлений на конвергентных межплитных границах как деформационных структурах наибольшего ранга

Основные результаты:

III. «Сейсмические» и деформационные предвестники активизации деформационных процессов на межплитных границах не просто определяются напряженным состоянием, но являются «параметрами процесса изменения внутренних напряжений».

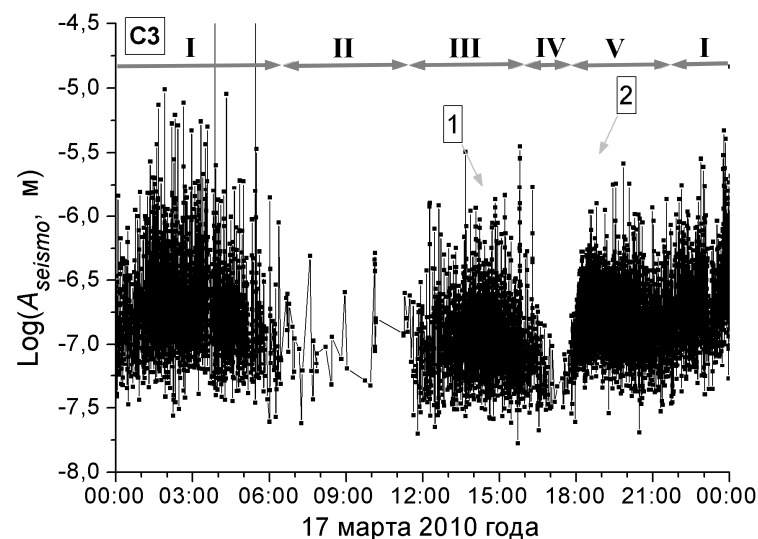
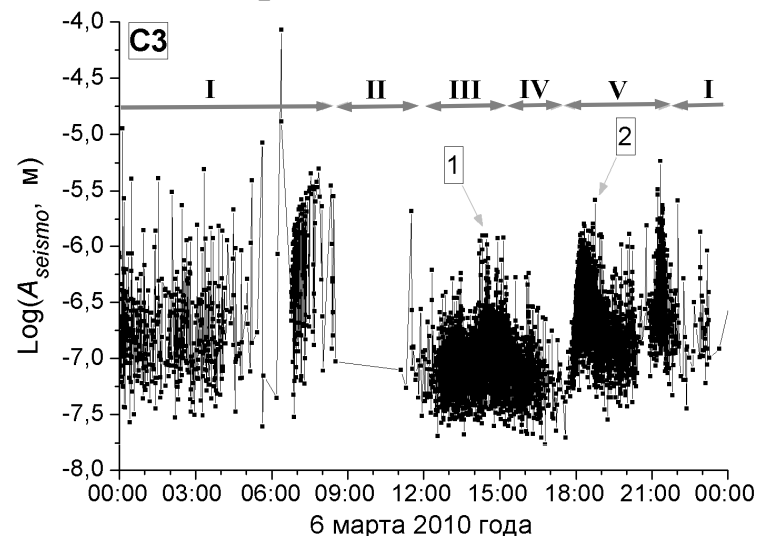
Появление продолжительных периодов «сейсмического затишья» перед активизацией конвергентных относительных перемещений плит



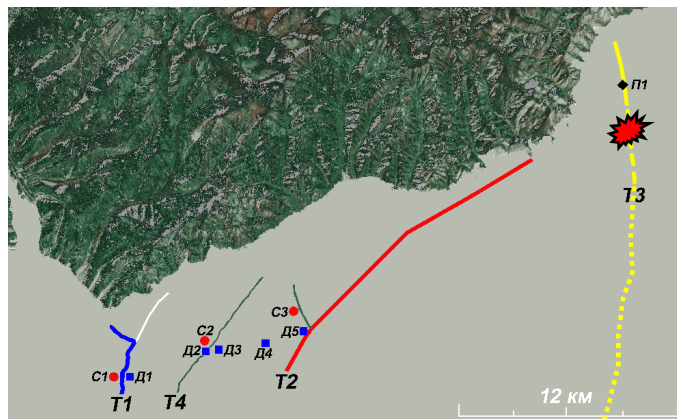
Суточная сейсмическая активность характеризуется следующими основными периодами:

- I. Период слабой ночной активности (возрастает доля относительно высокоамплитудных событий).
- II. Период утреннего «молчания», когда число событий близко к нулю.
- III. Период дневного возрастания сейсмической активности.
- IV. Кратковременный период послеполуденного «молчания» (количество событий резко снижается).
- V. Период вечернего возрастания сейсмической активности.

Периоды «затишья»

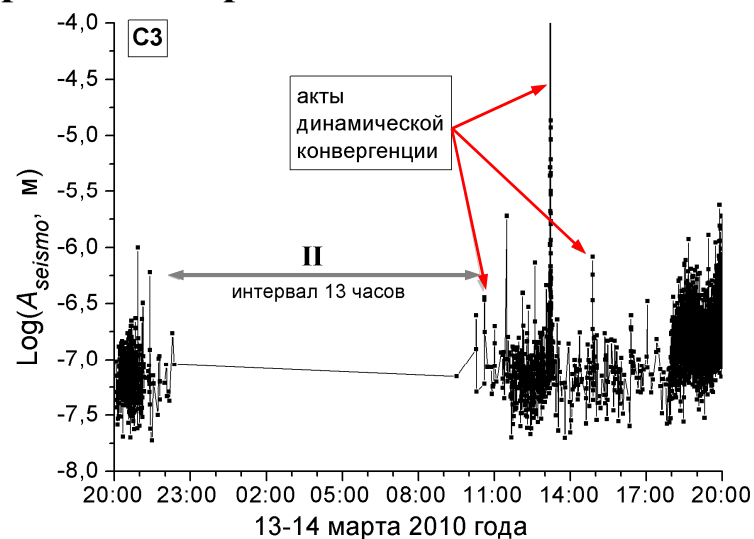
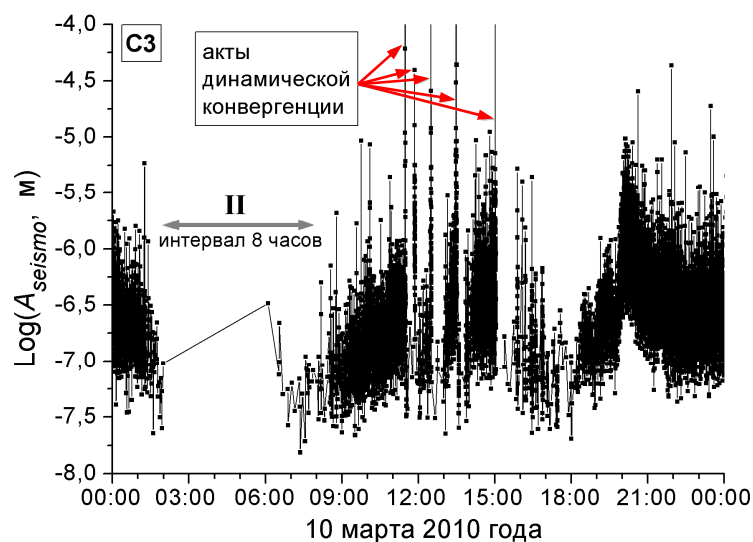


Появление продолжительных периодов «сейсмического затишья» перед активизацией конвергентных относительных перемещений плит



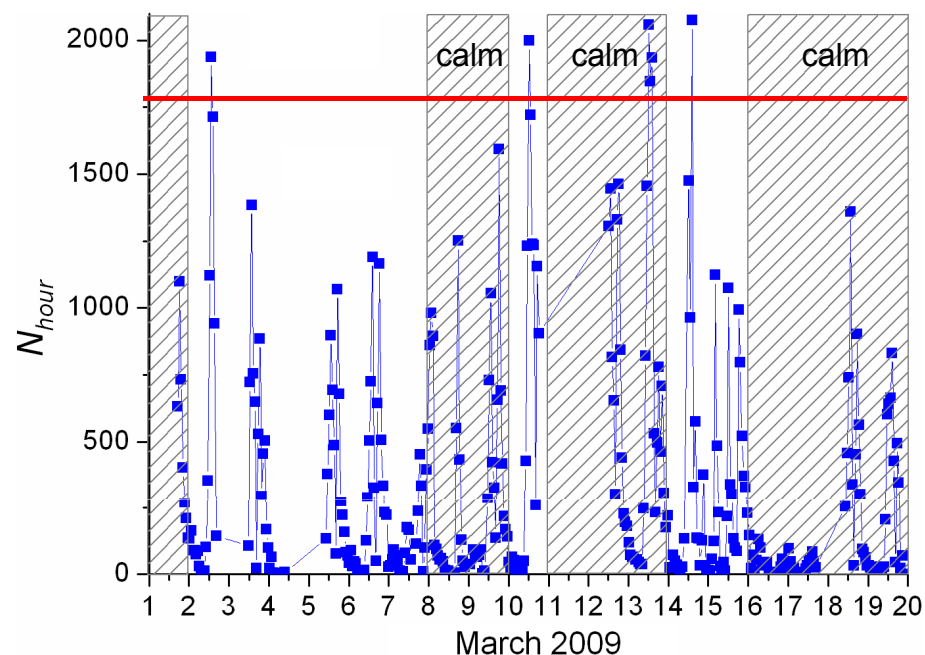
В дни активизации конвергентных процессов на **T3** продолжительность периода утреннего «молчания» (II) увеличивается в 2-3 раза за счет сокращения продолжительности предшествующего ему периода слабой ночной активности

Периоды активизации конвергентных процессов



Полученные результаты свидетельствуют о том, что процесс непосредственной подготовки высокоэнергетических релаксационных явлений на межплитных границах является длительным.

Последовательное усиление сейсмической активности перед активизацией конвергентных относительных перемещений плит



За 1-2 суток до активизации конвергентных процессов на межплитной границе начиналось систематическое усиление сейсмической активности (возрастание пикового и среднесуточного числа событий).

За несколько часов до активизации межплитных перемещений 2-го, 10-го и 14-го марта были зарегистрированы максимальные значения количества событий.

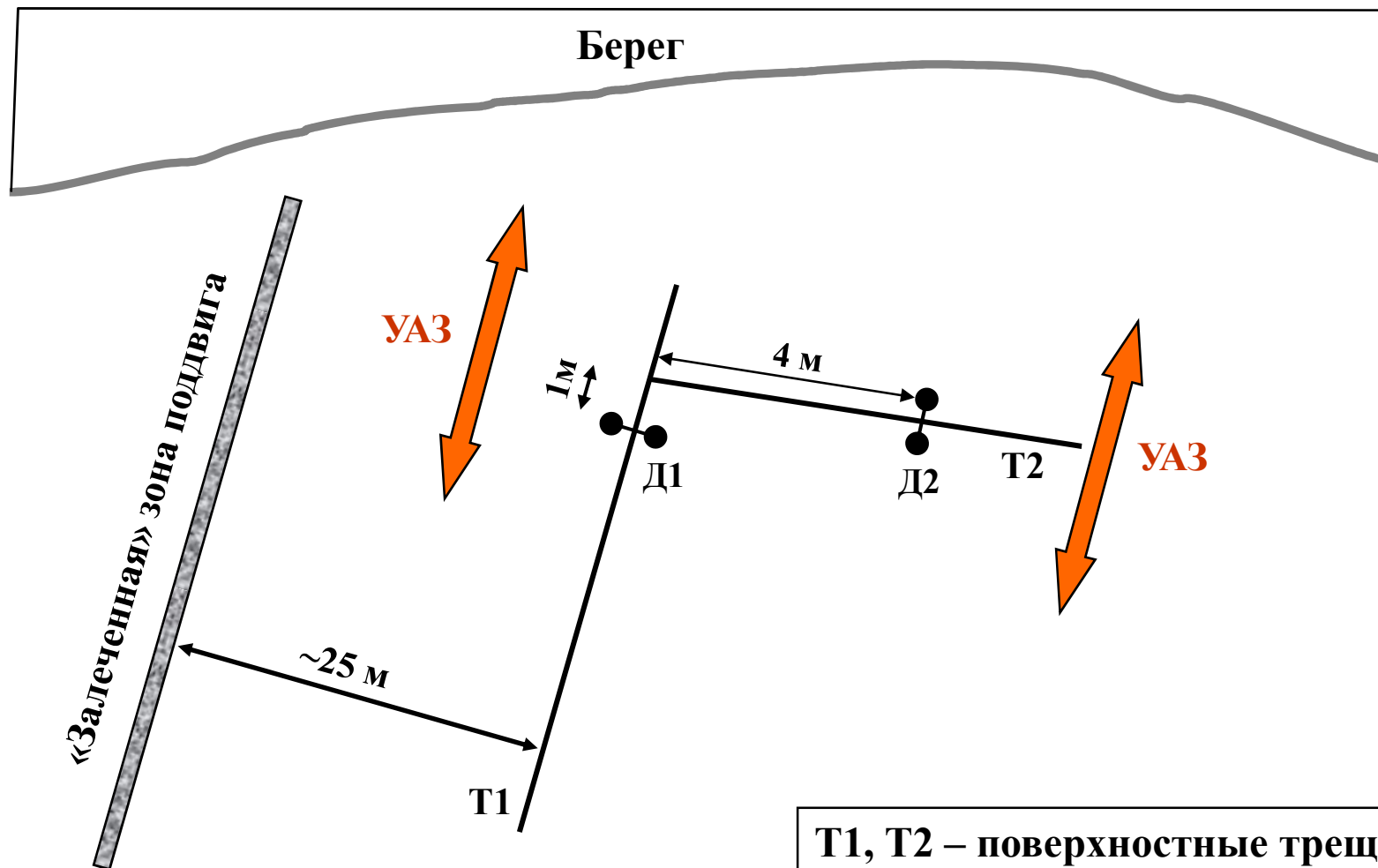
Различие особенностей сейсмического режима на стадии подготовки актов динамической конвергенции ледовых плит в различные годы может быть обусловлено существенным различием величины градиента напряжений по глубине и прочности хрупкого поверхностного слоя ледового покрова.

Последовательность и степень вовлечения деформационных механизмов низких уровней на этапе подготовки крупномасштабных динамических событий определяются рядом факторов, среди которых – особенности структуры, напряженного состояния и его изменения (предвестники являются функциями процесса).

Заключение

- Выявленные закономерности «сейсмического» режима и его связи с эволюцией напряженного состояния плитного ледового покрова отвечают наблюдаемым в сейсмоактивных районах земной коры.
- В целом полученные результаты комплексного исследования деформационных и сейсмических процессов в плитном ледовом покрове озера Байкал демонстрируют большие возможности для изучения ряда проблем, актуальных для геофизики и сейсмологии.
- Ледовый покров Байкала является адекватным и во многих отношениях привлекательным модельным объектом для комплексного анализа деформационного и сейсмического аспектов эволюции фрагментов земной коры.

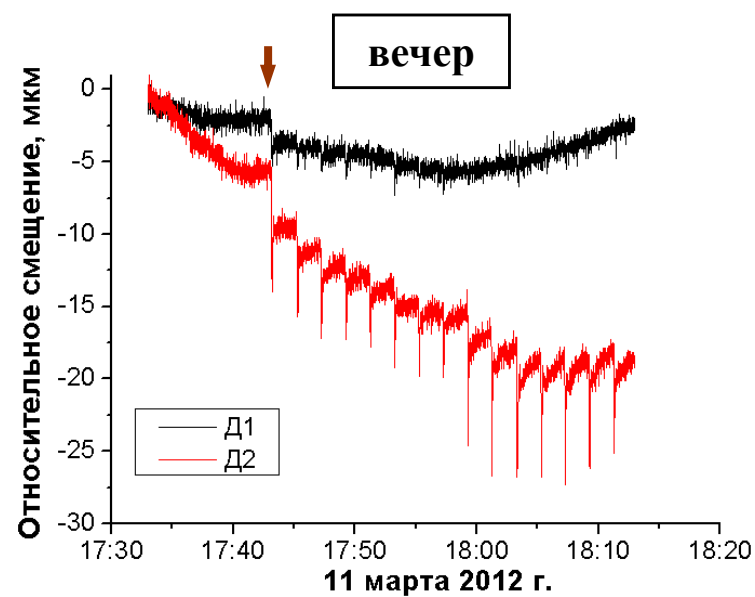
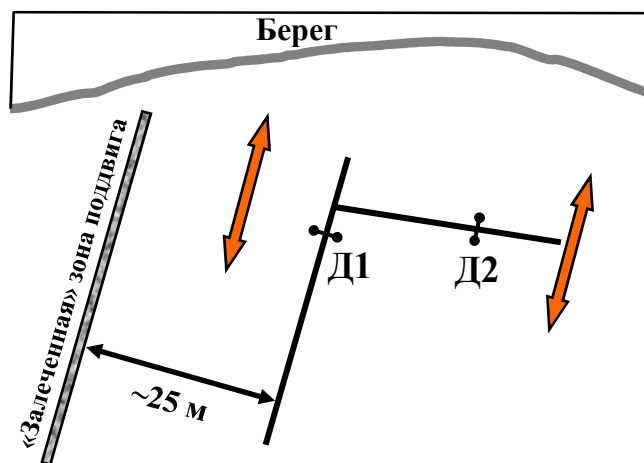
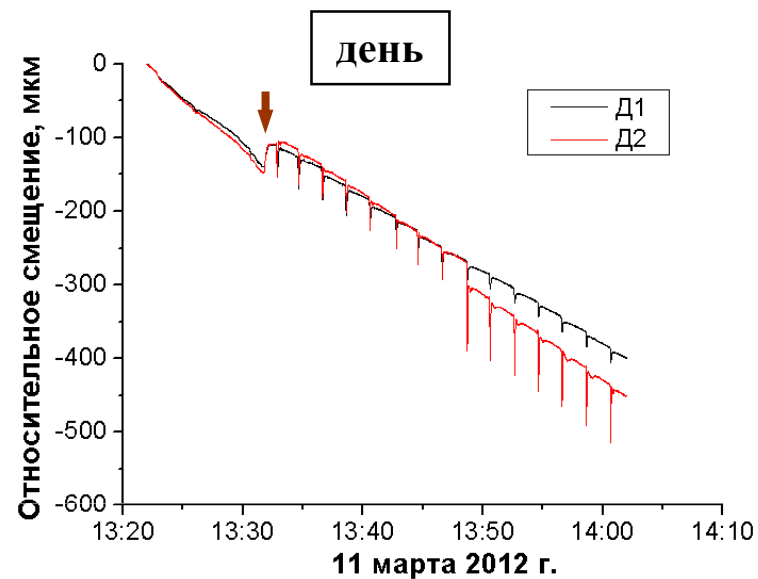
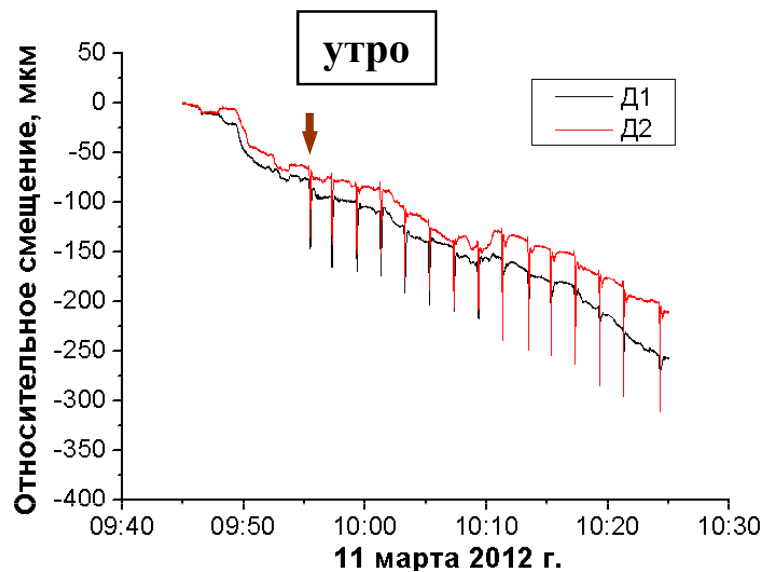
Изменение деформационного отклика несквозных поверхностных трещин на динамические воздействия



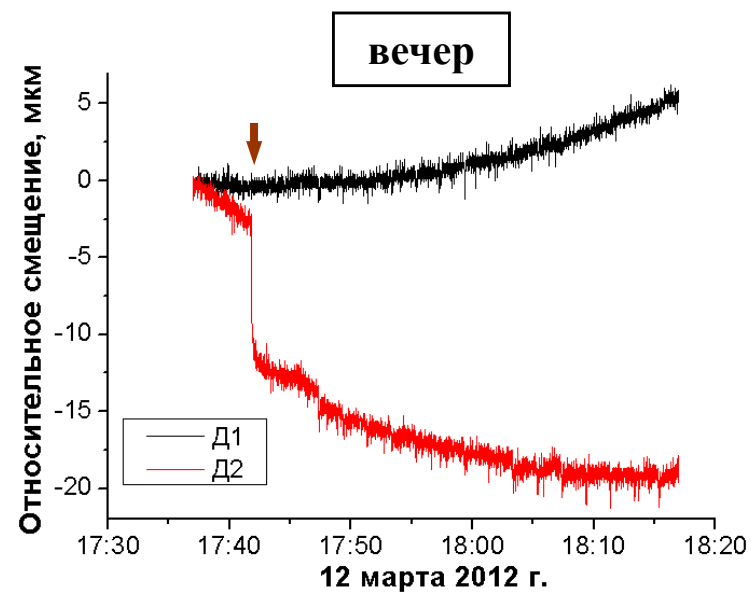
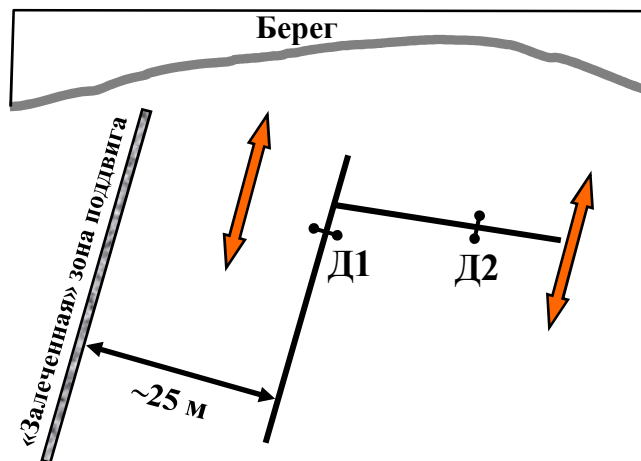
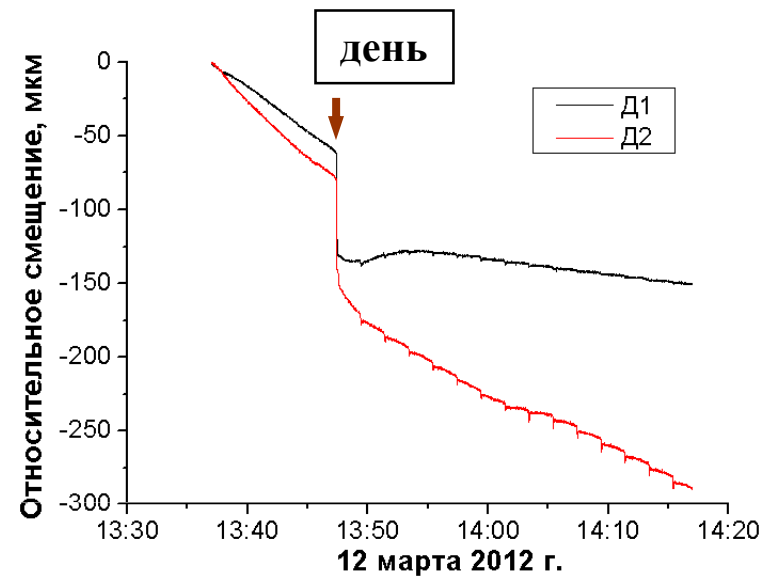
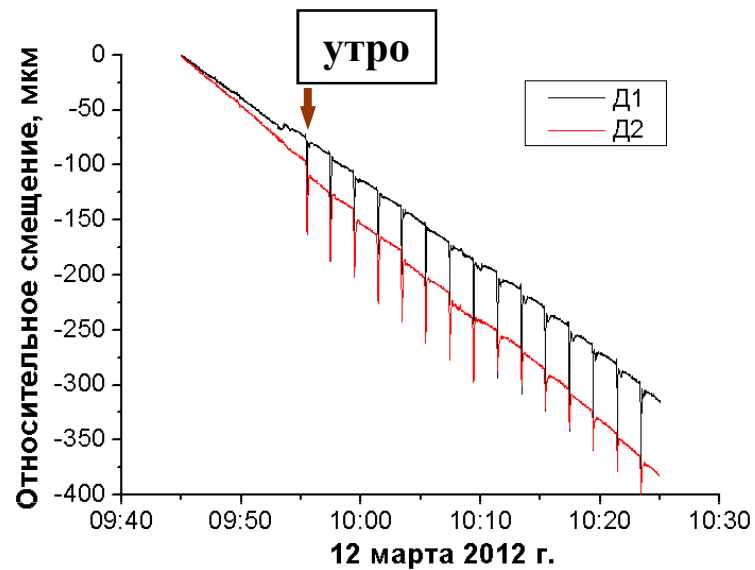
**T1, T2 – поверхностные трещины
(разрывы)**

Д1, Д2 – датчики деформаций

Изменение деформационного отклика несквозных поверхностных трещин на динамические воздействия



Изменение деформационного отклика несквозных поверхностных трещин на динамические воздействия (конвергенция плит в 16:20 и 17:18)



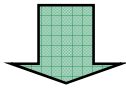
Important differences between ice sheets and lithosphere:

1. Main source of thermal changes in ice covers is atmosphere, while thermal regime in lithosphere is defined by substrate (asthenosphere).
2. Characteristic periods of temperature variations in atmosphere are 3-8 orders of magnitude higher than in asthenosphere.
3. Velocities of deformation processes in ice covers are 2-3 orders of magnitude higher than in lithosphere.
4. Characteristic time of reaching the ultimate state of ice cover fragments is 3-5 orders of magnitude lower than for lithosphere. So, in many cases ice could be considered as elasto-plastic material when studying deformation processes in ice covers. At the same time behavior of parts of lithosphere is conventionally studied using models of visco-elasto-plasticity.
5. Main factor of subduction zone development in lithosphere is negative buoyancy of underriding plate, while formation and development of analogous deformation-induced structures in ice cover is connected with horizontal stresses (mechanical constraint).
6. Studied ice fields and their regions are considered as plane, while horizontal motion of lithospheric plates is realized according to the laws of spherical geometry (this defect peculiar to most part of reduced models of the Earth's crust).

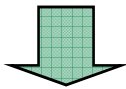
Анализ подобия деформационных процессов в литосфере и ледовом покрове с использованием критериев подобия

В приближении литосферы и астеносферы как Ньютоновских несжимаемых и медленно текущих жидкостей:

$$\sigma_{ij} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - p \delta_{ij}$$



$$\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{x} \sigma'_{ij} = \eta' \frac{\tilde{\eta} \tilde{v}}{\tilde{x}} \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x'_i} \right) - \tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{x} p' \delta_{ij}$$



$$\sigma'_{ij} = \eta' \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x'_i} \right) \frac{\tilde{\eta} \tilde{v}}{\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{x}^2} - p' \delta_{ij}$$

Подстановка:

$$\begin{cases} p = \tilde{p} p' = \tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{x} p' \\ x_i = \tilde{x} x'_i \\ v_i = \tilde{v} v'_i \end{cases}$$

$\tilde{\rho}, \tilde{g}, \tilde{x}, \tilde{\eta}, \tilde{v}$ - опорные значения

$\sigma'_{ij}, \eta', v'_i, x'_j, p'$ - безразмерные параметры

Системы с одинаковым значением безразмерного параметра $\frac{\tilde{\eta} \tilde{v}}{\tilde{\rho} \tilde{g} \tilde{x}^2}$ описываются одним и тем же уравнением и являются подобными с точки зрения деформационных процессов

Анализ подобия деформационных процессов в литосфере и ледовом покрове с использованием критериев подобия

Критерии подобия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{\eta}\tilde{v}}{\tilde{\rho}\tilde{g}\tilde{x}^2} = Const \\ \frac{\tilde{v}\tilde{t}}{\tilde{x}} = Const \\ \frac{\tilde{\rho}_{litho}}{\tilde{\rho}_{asth}} = Const \\ \frac{\tilde{\eta}_{litho}}{\tilde{\eta}_{asth}} = Const \end{array} \right.$$

Опорный параметр	Литосфера	Астеносфера	Ледовый покров	Вода
Вязкость η , Pa·s	4.9×10^{22}	1×10^{20}	$10^{15} \div 10^9$	10^{-3}
Плотность ρ , kg/m ³	3233-3333	3250	917	1000
Толщина x , m	7×10^4		0.6 ÷ 1.1	
Скорость плит v , m/s	2.5×10^{-9} (8 cm/year)		$10^{-6} \div 10^{-5}$ (0.1 ÷ 1 m/day)	
Время t , s	5.4×10^{13} (1.7 Ma)		$0.9 \div 1.8 \times 10^5$ (1 ÷ 2 days)	

Значения для литосферы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{\eta}\tilde{v}}{\tilde{\rho}\tilde{g}\tilde{x}^2} = 0.76 \approx 1 \\ \frac{\tilde{v}\tilde{t}}{\tilde{x}} = 2.5 \times 10^{-5} \\ \frac{\tilde{\rho}_{litho}}{\tilde{\rho}_{asth}} = 0.99 \div 1.03 \\ \frac{\tilde{\eta}_{litho}}{\tilde{\eta}_{asth}} = 5 \times 10^2 \end{array} \right.$$

Значения для ледового покрова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{\eta}\tilde{v}}{\tilde{\rho}\tilde{g}\tilde{x}^2} = 10^6 \div 1 \\ \frac{\tilde{v}\tilde{t}}{\tilde{x}} = 1 \\ \frac{\tilde{\rho}_{ice}}{\tilde{\rho}_{water}} = 0.917 \\ \frac{\tilde{\eta}_{ice}}{\tilde{\eta}_{water}} = 10^{18} \div 10^{12} \end{array} \right.$$