

**Сейсмотектоника российского сегмента Арктики**Е. В. Воронина<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики Земли  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 12.07.2023; после доработки 07.08.2023; подписана в печать 14.08.2023)

В работе рассмотрены очаги наиболее сильных землетрясений российского сегмента Арктики, произошедших за весь период наблюдений, начиная с 1976 г. по настоящий момент. Изучение полей напряжений и деформаций проводилось путем анализа тензора сейсмического момента зарегистрированных землетрясений. Этот анализ проводится впервые. Получены пространственные распределения коэффициента Лодэ–Надаи и скорости сейсмотектонической деформации.

PACS: 91.30 Px. УДК:550.347.2

Ключевые слова: механизм очага землетрясений, тензор сейсмического момента, коэффициент Лодэ–Надаи, скорость сейсмотектонической деформации.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2360901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2360901)

**ВВЕДЕНИЕ**

Сейсмотектоника изучает связь сейсмической активности региона с его строением. Она включает анализ полей напряжений и деформаций, относящихся к тем или иным тектоническим структурам. В российском сегменте Арктики самыми сейсмически активными тектоническими структурами являются рифтовая долина хребта Гаккеля и шельфовая часть моря Лаптевых. Хребет Гаккеля отождествляется с границей между Североамериканской и Евразийской литосферными плитами и является продолжением Срединно-Атлантического хребта. Поскольку в районе полуострова Таймыр ведется активная разработка нефтегазоносных месторождений (Роснефть, проект «Восток Ойл»), тема геодинамического мониторинга региона весьма актуальна.

Предметом исследования являются поля снимаемых напряжений и скоростей сейсмотектонических деформаций. Важная часть информации о напряженном состоянии земных недр может быть получена по данным о механизмах очагов землетрясений [1]. Проблема изучения напряженно-деформированного состояния сейсмически активной среды является одной из основополагающих задач современной геодинамики. Напряженно-деформированное состояние формируется в результате сочетания действия гравитационного поля, тектонических движений земной коры, а также сейсмических процессов. В ходе квазипериодических флуктуаций геофизических полей, которые свидетельствуют о том, что система литосферных плит находится в неустойчивом равновесии, достаточно даже сла-

бого воздействия для потери равновесия и возникновения землетрясения. Главной причиной мгновенных смещений масс горных пород в очаге землетрясения являются подвижки в зонах развивающихся тектонических разрывов. В результате могут происходить различные типы смещения блоков относительно друг друга. Подвижке по разрыву предшествует нарастание напряжений и накопление деформаций в области очага, которое происходит до тех пор, пока не будет превзойден предел прочности горных пород. Смещение по разрыву происходит со снятием избыточных напряжений.

**1. СЕЙСМОТЕКТОНИКА РЕГИОНА**

Первые сведения о землетрясениях Арктического региона (область в пределах Северного полярного круга) были получены после организации в 1910–1912 гг. нескольких отечественных и зарубежных сейсмических станций. Относительно резкое расширение сети станций произошло в 1956–1957 гг. в связи с реализацией программы Международного геофизического года. В течение последующих 3–4 десятилетий из-за малого количества станций и их удаленности регистрировались лишь наиболее сильные события.

**1.1. Тектоника Срединно-океанического хребта Гаккеля**

Хребет Гаккеля формирует границу между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами. Он простирается примерно на 1800 км от 83° с. ш.; 6° з. д. до 77° с. ш.; 125° в. д. с глубиной проникновения в отдельных районах (4–5) км. Сейсмический пояс, трассирующий хребет Гаккеля, имеет практически постоянное простираение и среднюю ширину не более (20–30) км. Наибо-

\* [Voronina@physics.msu.ru](mailto:Voronina@physics.msu.ru)

лее заметные отклонения эпицентров землетрясений от осевой линии хребта устанавливаются на участке между  $40^\circ$  в. д. и  $80^\circ$  в. д. Здесь же становится менее отчетливой, вплоть до исчезновения, рифтовая долина [2]. Хребет разделяет котловины Амундсена и Нансена. Наличие вулканических излияний можно предполагать практически на всем его протяжении, включая и зону сочленения с Лаптевским шельфом. Хребет Гаккеля состоит в основном из базальтов и габбро-базальтов. Эти горные породы образовались в результате вулканической активности. Крупнейший вулканический центр расположен в районе  $85^\circ$  в. д., для него характерна сильная вулканическая активность в 1999 г. с подводным извержением и роем землетрясений, зарегистрированных на телесеизмических расстояниях. Характерен ультрамедленный спрединг хребта Гаккеля. Скорость спрединга минимальная из всех срединно-океанических хребтов, ее значения варьируют от 1.4–1.5 до 0.6 см/год. Здесь доминирует сеймотектонический режим растяжения, где главные оси напряжений располагаются субширотно, в крест простирания основных структурных элементов.

## 1.2. Тектоника шельфа моря Лаптевых

Шельф моря Лаптевых представляет собой регион, где срединно-океанический спрединговый хребет Гаккеля переходит в континентальную рифтовую зону [3]. Структурные элементы системы — рифтовые грабены и межрифтовые горсты протяженностью около 500 км, которые простираются с севера-северо-запада на юг-юго-восток, т. е. в направлении, совпадающем в основном с общим уклоном дна моря. Ширина рифтовых грабенов составляет 20–25 км. Горсты, как правило, шире грабенов. Так, Восточно-Лаптевский мегагорст имеет ширину от 100 до 200 км. Линия эпицентров землетрясений направлена не в центральную часть шельфа, а на юго-восток, в сторону Новосибирских островов. В юго-восточной части акватории плотность эпицентров заметно ниже и распределение их близко к рассеянному. Рифтогенез на шельфе моря Лаптевых по параметрам сеймотектонических деформаций определяет режим поперечного субгоризонтального растяжения. На западной и восточной границах микроплиты моря Лаптевых фиксируется режим сжатия как реакция на рифтинг, действующий в пределах шельфа.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений от хребта Гаккеля к шельфу моря Лаптевых свидетельствует о смене линейной деструкции земной коры, характерной для спрединговой зоны, на диффузную.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Закон Гука для описания процессов неупругого деформирования и последующего разрушения гор-

ных пород в релаксационной форме имеет вид [4]:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda (\dot{\theta}^t - \dot{\theta}^p) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\varepsilon}_{ij}^t - \dot{\varepsilon}_{ij}^p),$$

где  $\dot{\sigma}_{ij}$  — тензор приращения напряжений,  $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij}$  — тензор напряжений в виде шаровой и девиаторной части,  $p$  — давление,  $S_{ij}$  — девиатор напряжений,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера,  $\mu$  — модуль сдвига,  $\lambda$  — параметр Ламе,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t$  — полная скорость деформации среды,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$  — скорость неупругой составляющей,  $\dot{\theta}^t$  — полная скорость объемной деформации, определяемая условиями нагружения среды,  $\dot{\theta}^p$  — скорость неупругой объемной деформации (скорость дилатансии), определяемая внутренними свойствами среды. Поскольку, в очаговых зонах землетрясений разрушение осуществляется преимущественно в виде сдвига, объемную деформацию не рассматриваем.

Полная скорость деформации определяется по формуле

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^t = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

где  $v_i$  — компоненты вектора скорости смещения по разрыву. Разность полной скорости деформации и скорости неупругого деформирования описывает упругую составляющую в виде излучения сейсмических волн.

Из закона Гука, записанного в релаксационной форме, следует:

1. Упругие напряжения растут в каждой локальной точке нагружаемой среды пропорционально росту полных скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t$ .
2. Релаксируют напряжения в соответствии с развитием неупругих реакций в нагружаемой среде, определяемым скоростью неупругих деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ .

Отсюда можно сделать вывод, что именно конкуренция положительной (дестабилизирующей,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t > \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,  $\Delta\sigma_{ij} > 0$ ) и отрицательной (стабилизирующей,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t < \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,  $\Delta\sigma_{ij} < 0$ ) обратных связей является причиной того, что разрушение является последовательностью нарастающих катастроф, между которыми имеются квазиравновесные стадии накопления повреждений.

При  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t < \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,  $\Delta\sigma_{ij} < 0$  идет процесс релаксации, реализуется отрицательная обратная связь, стабилизирующая деформационный процесс к состоянию динамического равновесия. При  $\dot{\varepsilon}_{ij}^t > \dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,  $\Delta\sigma_{ij} > 0$  напряжения растут, увеличивая скорость неупругих деформаций, что приводит к сверхбыстрому катастрофическому режиму разрушения среды и дегградации ее механических параметров.

Неупругая деформация в очаговых зонах связана с необратимыми смещениями, соответствующими средней подвижке по разрыву, которая определяется из величины скалярного сейсмического момента [1]:

$$M_0 = \mu \bar{u} S,$$

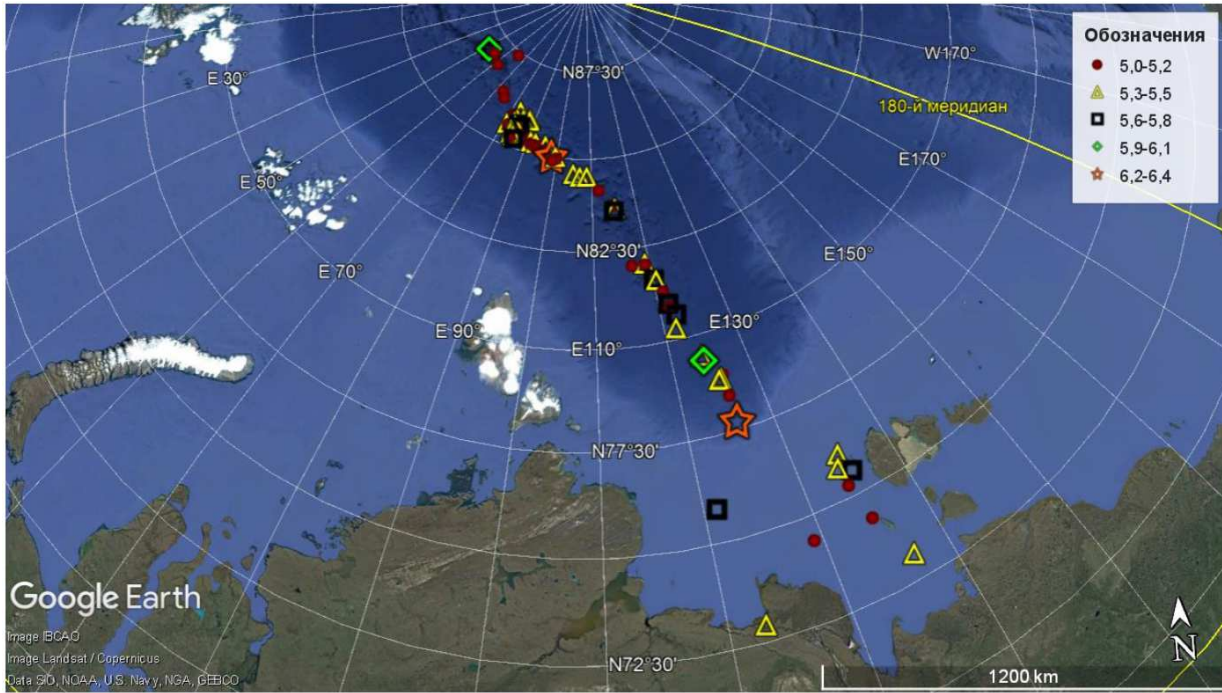


Рис. 1. Эпицентры наиболее крупных землетрясений Арктики

где  $\mu$  — модуль сдвига,  $\bar{u}$  — средняя подвижка в очаге,  $S$  — площадь поверхности разрыва.

Скорость неупругих (сеймотектонических) деформаций рассчитывается по формуле Кострова [5]:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu\Delta T\Delta V} \sum_{k=1}^N M_{0ij}^k, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — период наблюдений,  $\Delta V$  — рассматриваемый сейсмогенный объем,  $\mu$  — модуль сдвига в среде,  $M_{0ij}$  — тензор скалярного сейсмического момента,  $N$  — количество землетрясений, попавших в выделенный объем.

Тензор сейсмического момента  $M_{ij}$ , составляющей частью которого является скалярный сейсмический момент, описывает деформацию в источнике на основе обобщенных силовых пар: трех силовых диполей (диагональные компоненты) и трех силовых пар с моментом. Тензор сдвигового источника типа двойного диполя является девиатором.

Представление тензора сейсмического момента в главных осях определяет собственные значения главных осей напряжений: оси растяжения  $T$ , промежуточной оси  $N$ , оси сжатия  $P$ , действующих в очаговой зоне землетрясения. Тензор снимаемых напряжений также является девиатором.

Вид напряженного состояния среды в очаговых зонах землетрясений определяется коэффициентом

Лоде–Надаи [6]:

$$\begin{aligned} \mu_\sigma &= \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_3} = \\ &= \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{3\sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\sigma_1$  — собственные значения главной оси растяжения,  $\sigma_2$  — собственные значения промежуточной оси,  $\sigma_3$  — собственные значения главной оси сжатия. Считается, что  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

Повреждения в областях растяжения–сдвига ( $\mu_\sigma > 0$ ) начинают накапливаться при существенно меньших напряжениях, чем при  $\mu_\sigma < 0$  в областях сжатия–сдвига. Отсюда прочностные параметры среды будут деградировать быстрее в областях растяжения–сдвига.

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе рассмотрены землетрясения в области от  $70^\circ$  до  $90^\circ$  с.ш. и от  $40^\circ$  до  $150^\circ$  в.д. за период с 1976 г. по настоящее время. Всего в регионе зарегистрировано 276 землетрясений, из них 81 событие с магнитудой 5 и выше и определенным тензором сейсмического момента. Сведения по механизмам очагов землетрясений получены с сайта Гарвардского каталога [7]. Распределение эпицентров землетрясений с классификацией по магнитудам приведено на рис. 1.

Из рассмотренных в работе землетрясений 72 имеют механизмы очага типа сброса, 5 — типа взброса и 4 — чистого сдвига. Отсутствие сдвиговых механизмов очага обычно нехарактерно для ди-

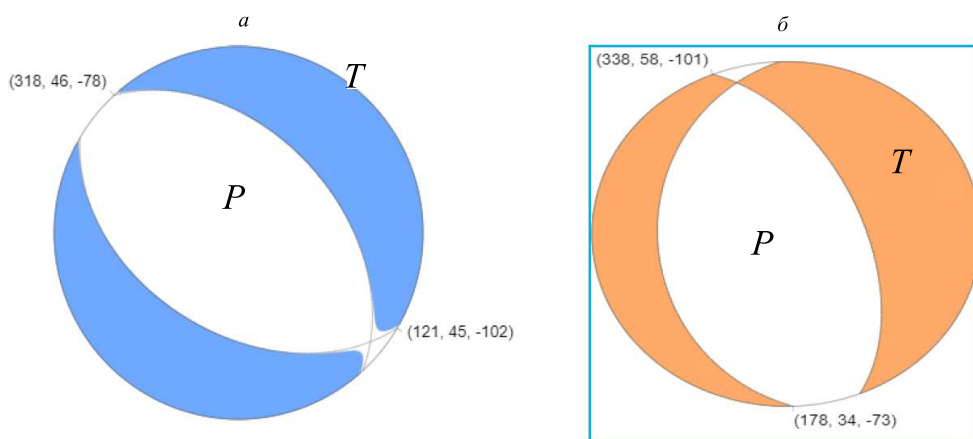


Рис. 2. Механизмы очагов землетрясений: *a* — 06.03.2005 в районе хребта Гаккеля с магнитудой  $M=6.3$ , *б* — 21.03.1988 в море Лаптевых с магнитудой  $M=6.4$

вергентных границ тектонических плит, каковым является хребет Гаккеля, и представляет собой, помимо самой медленной скорости спрединга, еще одну особенность этой тектонической структуры.

Из анализа данных следует, что в регионе произошло всего два землетрясения с магнитудой выше 6 в районе северной части хребта Гаккеля и в области перехода хребта Гаккеля к плите моря Лаптевых. Механизмы очагов этих землетрясений с угловыми параметрами нодальных плоскостей и точками выхода осей напряжений (оси сжатия  $P$  и оси растяжения  $T$ ) приведены на рис. 2. Эти события с механизмами очага типа сбросов произошли в условиях доминирующего горизонтального растяжения.

Расположение анализируемых землетрясений с указанием числа событий по магнитудам приведено на рис. 3.

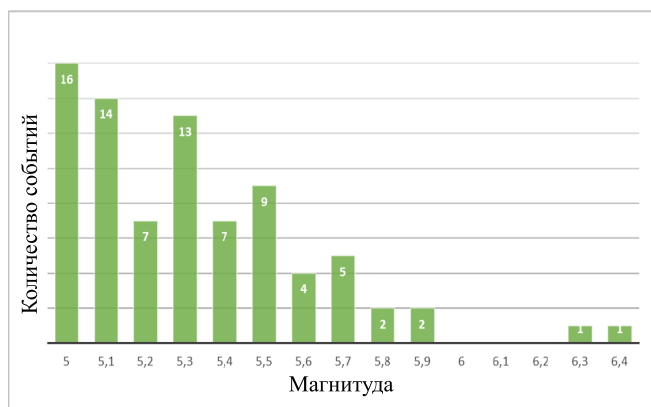


Рис. 3. Гистограмма расположения событий по магнитудам

Классификация по числу произошедших событий показывает, что наибольшее число землетрясений имеет магнитуды 5.0–5.3, что свидетельствует о средней сейсмической активности региона.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

##### 4.1. Оценка ориентации главных осей напряжений

Изучение полей напряжений и деформаций проводилось путем анализа тензора сейсмического момента зарегистрированных землетрясений. Тензор сейсмического момента характеризуется тремя собственными значениями и ориентацией главных осей деформаций и напряжений.

В полярной системе координат были построены азимуты осей растяжения и сжатия, приведенные на рис. 4. По радиусу обозначено число событий.

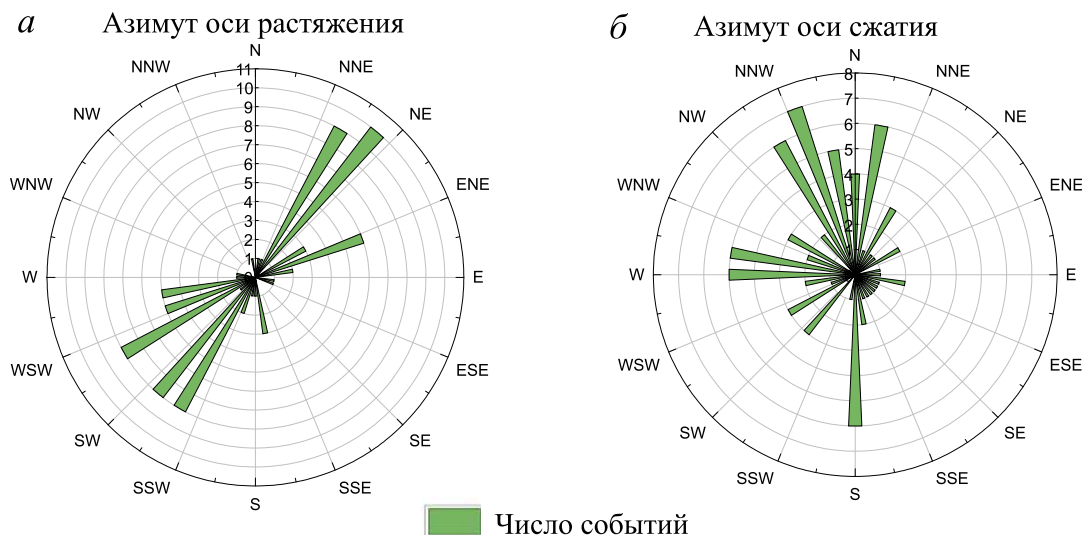
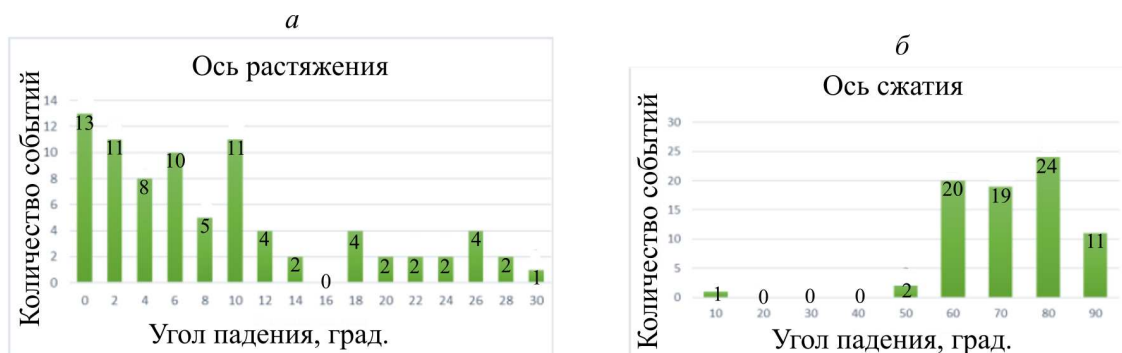
Из построенных диаграмм видно, что главные оси напряжений растяжения направлены в крест простирания основных структурных элементов хребта Гаккеля и восточного шельфа моря Лаптевых и имеют северо-восточное направление. Для оси сжатия ориентация более хаотична, но преобладает северо-западная ориентация, соответствующая простиранию вдоль хребта Гаккеля.

Углы падения главных осей напряжений представлены на рис. 5.

Из этих данных также следует, что растяжение происходит в горизонтальной плоскости, а сжатие — преимущественно в вертикальной.

##### 4.2. Пространственное распределение коэффициента Лоде–Надаи

Вид напряженного состояния очаговых зон землетрясений определяется по собственным значениям тензора напряжений формулой (2) и называется коэффициентом Лоде–Надаи. Если коэффициент Лоде–Надаи равен  $(0.96 \div 1)$  — имеет место двухосное горизонтальное сжатие;  $(0.71 \div 0.96)$  — тип очага взброс;  $(0.26 \div 0.7)$  — одноосное горизонтальное сжатие;  $(0.26 \div -0.26)$  — тип очага


 Рис. 4. Распределение азимутов главных осей напряжений: *a* — растяжения *T* и *б* — сжатия *P*

 Рис. 5. Углы падения главных осей напряжений: *a* — оси растяжения, *б* — оси сжатия

сдвиг;  $(-0.26 \div -0.71)$  — одноосное горизонтальное растяжение;  $(-0.71 \div -0.96)$  — тип очага сброс;  $(-0.96 \div -1)$  — двухосное горизонтальное растяжение.

Современное распределение коэффициента Лодэ–Надаи в изучаемом регионе и эпицентры землетрясений в виде синих точек показаны на рис. 6. Толстой красной линией обозначено разделение среды на области сжатия и растяжения, пунктирные красные линии определяют границы чистого сдвига.

Большинство зарегистрированных землетрясений произошло в условиях горизонтального растяжения среды. Механизмы очагов этих землетрясений являются сбросами. Чистых сдвиговых механизмов практически нет, а в западной части моря Лаптевых у побережья Таймыра произошло несколько событий типа взброса, это свидетельствует о том, что в данной части региона наблюдается горизонтальное сжатие.

В области хребта Гаккеля доминирует сейсмотектонический режим растяжения, который объясняет спрединг хребта. В шельфовой зоне моря Лаптевых напряженное состояние среды переменчи-

во: вблизи полуострова Таймыр имеет место сжатие, а у Новосибирских островов — растяжение. Превалирующим является режим одноосного горизонтального растяжения. Двухосное напряженное состояние среды в регионе не наблюдается. Следует заметить, что режим нагружения нестабилен и меняется с каждым более-менее сильным землетрясением.

#### 4.3. Оценка скорости сейсмотектонической деформации

Скорости сейсмотектонической деформации определялись по формуле (1) Б.В. Кострова. Сейсмогенный объем рассчитывался для ячеек площадью  $1^\circ \times 1^\circ$  сетки ( $1^\circ = 111.1$  км), умноженной на глубину землетрясений, попавших в каждую ячейку. Таких ячеек оказалось 44. Период наблюдений определялся из разности вступлений самого позднего и самого раннего события в соответствующей ячейке. Средний модуль сдвига принимался равным  $3 \times 10^{10}$  Па, что соответствует обобщенной модели строения земной коры региона. Суммар-

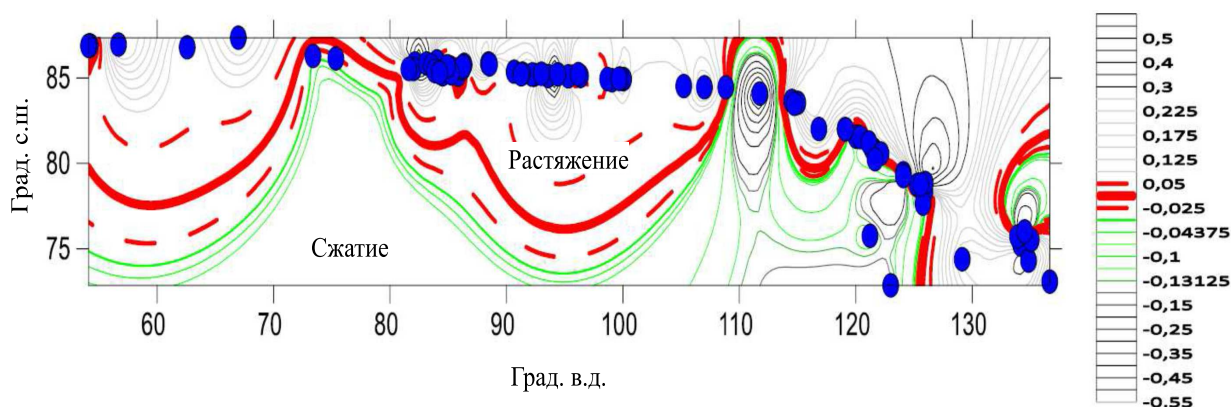


Рис. 6. Распределение коэффициента Лове–Надаи и вид напряженного состояния региона

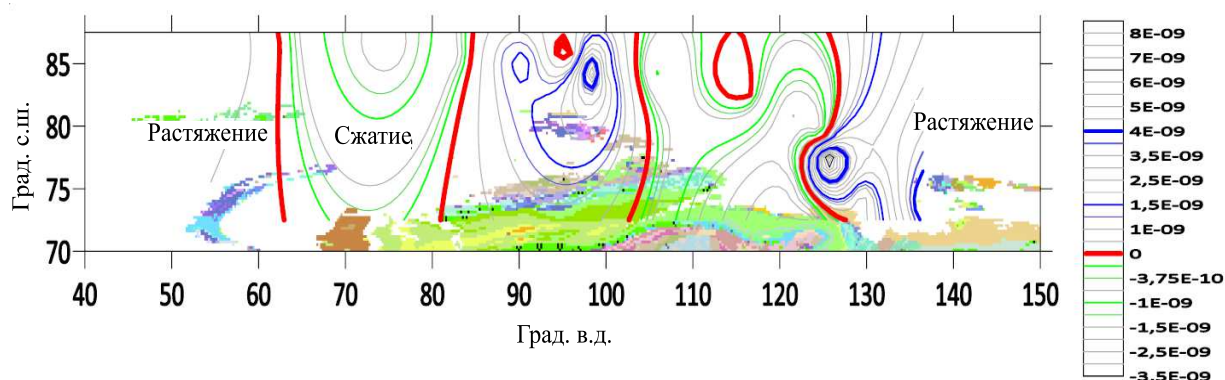


Рис. 7. Пространственное распределение скоростей сеймотектонической деформаций

ный сейсмический момент определялся как сумма скалярных сейсмических моментов землетрясений в каждой ячейке. Пространственное распределение скоростей сеймотектонических деформаций, нанесенное на геологическую карту региона, показано на рис. 7.

Здесь имеет место чередование областей деформаций сжатия и растяжения, согласующееся с распределением коэффициентов Лове–Надаи, а также выделены области сейсмического затишья и высоких градиентов скоростей сеймотектонической деформации, которые могут быть областями последующих в будущем землетрясений. Эти области расположены в центральной части хребта Гаккеля и в западной части моря Лаптевых, вблизи с побережьем полуострова Таймыр. Среднее значение полученных значений скорости, равное  $3 \times 10^{-9}$  1/год, соответствует литературным данным GPS [8].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния очаговых зон наиболее

сильных землетрясений российского сегмента Арктики могут быть сделаны следующие выводы:

1. Сейсмичность российского сегмента Арктики характеризуется землетрясениями средней силы в районах хребта Гаккеля и окраин моря Лаптевых.
2. Спрединг хребта Гаккеля происходит со скоростями сеймотектонической деформации существенно меньшими, чем это наблюдается на других срединно-океанических хребтах.
3. Структура хребта Гаккеля представляет собой области с чередующимися режимами нагружения. Наиболее опасными являются области затишья в условиях растяжения. Вдоль всего протяжения хребет Гаккеля не нарушен трансформными разломами.
4. Море Лаптевых представляет собой отдельную микроплиту, западная часть которой является наиболее сейсмоопасной.

Мониторинг сейсмической ситуации требует дополнительной установки в Арктическом регионе регистрирующих сейсмических станций.

- [1] Воронина Е.В. Физика очага землетрясения. М.: Физический факультет МГУ, 2010.
- [2] Itaeva L.P., Gusev G.S., Itaev V.S. et al. // *Geodynamics and tectonophysics*. **8**, № 4. 637. (2017).
- [3] Пискарев А.Л., Аветисов Г.П., Киреев А.А. и др. // *Геотектоника*. № 6. 3. (2018).
- [4] Макаров П.В., Еремин М.О. // Физическая мезомеханика. **16**, № 1. 5. (2013).
- [5] Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975.
- [6] Юнга С.Л. // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 10. 14. (1979).
- [7] <https://www.globalcmt.org>
- [8] Лобковский Л.И., Гараган И.А., Алексеев Д.А. // *ДАН*. **480**, № 4. 469. (2018).

## Seismotectonics of Russian segment of the Arctic

E. V. Voronina

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

*E-mail: [voronina@physics.msu.ru](mailto:voronina@physics.msu.ru)*

The paper considers the foci of the most severe earthquakes in the Russian segment of the Arctic that occurred during the entire observation period, from 1976 to the present. The stress and strain fields were studied by analyzing the tensor of the seismic moment of registered earthquakes. This analysis is being conducted for the first time. Spatial distributions of the Lode-Nadai coefficient and the rate of seismotectonic deformation are obtained.

PACS: 91.30 Pх.

*Keywords:* earthquake source mechanism, seismic moment tensor, Lode–Nadai coefficient, seismotectonic strain rate.

*Received 12 July 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 6. Pp. 863–869.

### Сведения об авторе

Воронина Елена Викторовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: [voronina@physics.msu.ru](mailto:voronina@physics.msu.ru).