

Графический интерфейс программы, позволяющий производить выше описанные манипуляции, показан на рис. 1.

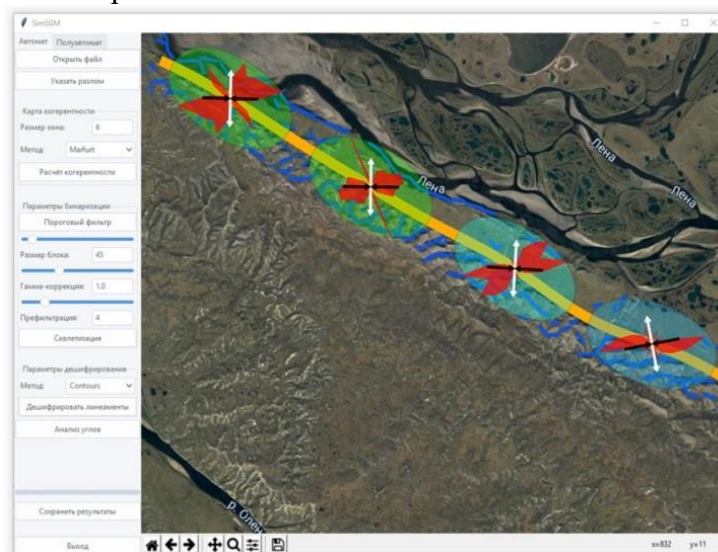


Рис. 1 – Интерфейс программы (v. 09.2019)

*Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ИФЗ РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25-33.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 375 с.
3. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3-22.
4. Kass M., et.al. Snakes:Active contour models // International Journal of Computer Vision 1 (4): 321 (1988).
5. Marfurt K., et.al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm // Geophysics. 1998. V. 63, (4). P. 1150-1165.
6. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping // Geophysics. 1999. V. 64, (5). P. 1468-1479.
7. Randen T., et.al. Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis // 70th Annual International Meeting. SEG. Expanded Abstracts. 2000. P. 668-671.
8. Von Gioi R.G., et.al. LSD: a Line Segment Detector // Image Processing On Line. 2012. V. 2. P. 35-55.
9. Suzuki S., Abe K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // CVGIP. 1985. V. 30, (1). P. 32-46.

#### СТРУКТУРА НОВЕЙШЕГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Гордеев Н.А., Сим Л.А.

Институт Физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, gord@ifz.ru

Арктический спрединг Хребта Гаккеля оказывает влияние на формирование новейших стресс-состояний северной окраины Сибирской платформы, что наблюдается в виде большого количества параллельно вытянутых грабенов в шельфовой части моря

Лаптевых, еденичных определениях механизмов очагов землетрясений сбросового типа и сдвигового типа с осью сжатия северо-воосточного простирания. Помимо этого влияние спрединга подтверждается методом реконструкции сдвиговых новейших тектонических напряжений в северном окончании Кряжа Чекановского, здесь обилие реконструированных главных осей сжатия имеют ориентировку северо-восточного простирания.

Другие крупные новейшие структуры в области шельфа моря Лаптевых и севера Сибирской платформы – это Оленекское поднятие и Верхоянский ороген. Эти структуры сформированы самостоятельными источниками напряжений и являются структурами первого ранга, так как все остальные структурные единицы подстраиваются и подчиняются ходу развития перечисленных выше структур.

Территория исследования относится к сложному сочленению крупных тектонических структур Сибирской платформы (рис. 1): Шельф моря Лаптевых, Оленекское поднятие, Верхоянский хребет, Предверхоанский и Лено-Анабарский прогибы.

Для определения условий формирования новейшего поля напряжения нами был привлечен комплексный тектонофизический анализ и литературные источники.

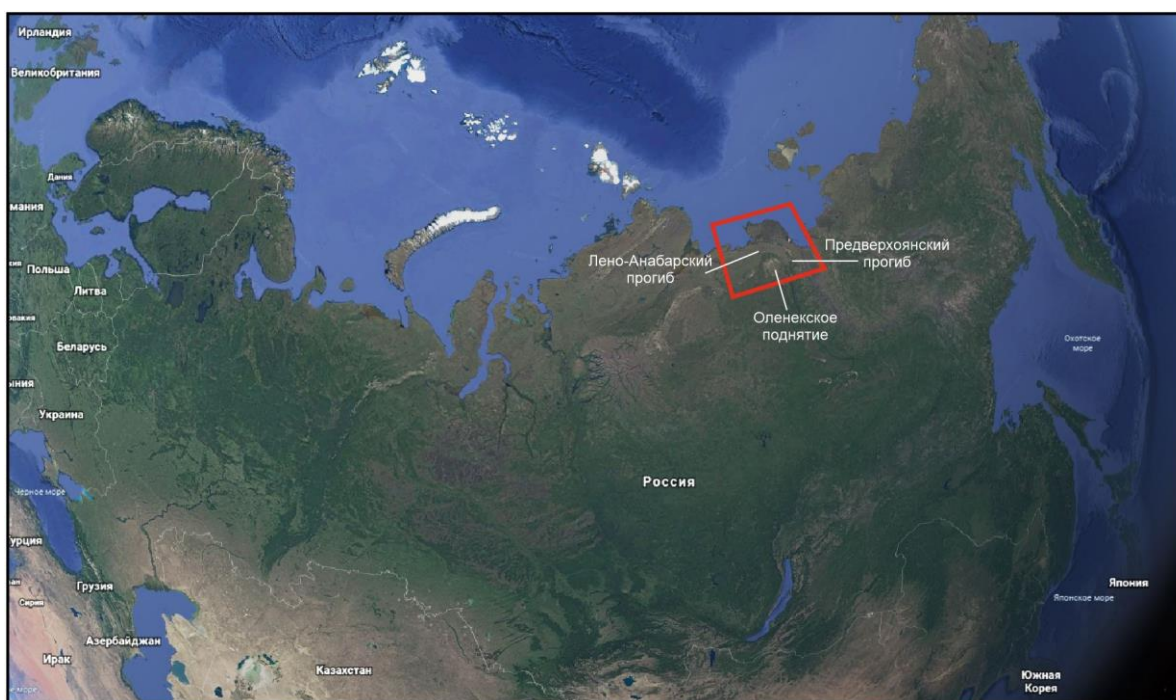


Рис. 1 – Район исследования, красный четырехугольник

#### *Методика.*

Метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений (Sim, 1991; Sim, Sergeev, 1996) (структурно-геоморфологический метод) базируется на анализе закономерно ориентированных оперяющих разрывов в зоне динамического влияния сдвигов, откартированных при полевом изучении и при моделировании сдвигов, обобщенных М.В. Гзовским (Gzovsky, 1975). Фактическим материалом для этого метода служат данные дешифрирования линеаментов – предполагаемых сдвигов и мелких прямолинейных элементов рельефа (мегатрещин) вблизи него. Если их взаимные ориентировки как между собой, так и по отношению к линеаменту соответствуют ориентировкам оперяющих разрывов в зоне сдвигов, то определяются горизонтальные ориентировки осей сжатия и растяжения, направление сдвигового перемещения по разлому и геодинамическая обстановка формирования разлома (дополнительного сжатия или растяжения). Возраст восстановленных структурно-геоморфологическим (СГ)

методом стресс-состояний принимается за новейший и современный из-за выраженности мегатрещин в новейших и четвертичных отложениях. На рис. 2 показаны основные типы взаимных ориентировок опережающих разрывов и осей сдвиговых тектонических напряжений (Гзовский, 1975) которые можно восстановить предлагаемым методом.

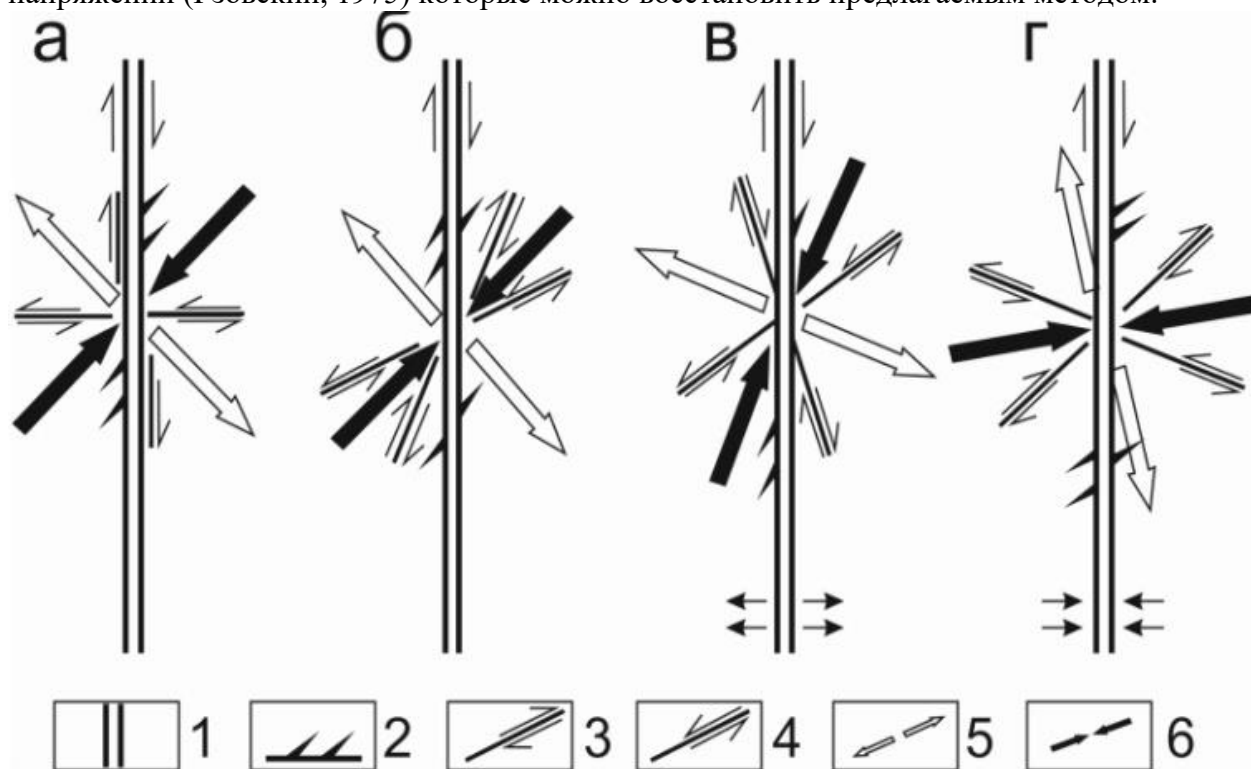


Рис. 2 – Парагенезис опережающих трещин в зоне сдвига (Гзовский, 1975), или «палетка Гзовского»

Варианты напряженного состояния при углах скальвания: близких к  $45^\circ$  (а),  $<45^\circ$  (б); обстановки дополнительного растяжения (с) и сжатия (д) – показаны в нижней части разломов стрелками, нормальными к плоскости разлома.

1 – разлом; 2 – трещина отрыва; 3, 4 – сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 – ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости

Сотрудниками ИФЗ РАН разработан и успешно применяется программный пакет “SimSGM”. Реализован способ автоматического применения структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим (Сим, 1991) (Гордеев, 2019). Основной идеей при автоматизации дешифрирования является применение алгоритмов компьютерного зрения. На настоящий момент доступны дешифрирование карт высот, ручное дешифрирование с автоматической классификацией по Гзовскому, автоматический анализ спутниковых снимков. Программа находится на этапе усовершенствования.

*Неотектоническое строение северо-востока Сибирской платформы и обрамления.*

Новейшими структурами северного окончания Сибирской платформы являются Верхоянский ороген, Оленекское поднятие, кряж Чекановского, который плавно переходит в ступенеобразные поднятия и дельту реки Лена. Все структуры рассечены новейшими и реактивированным в новейший этап разрывами. Разрывные структуры повторяют и облекают новейшие структуры (рис. 3). По 3D цифровой модели видно, что кряж Чекановского и ступенеобразные поднятия образуют на поверхности



тектонический вал, ограниченный с вытянутых краев разрывами, вал хорошо видно по геоморфологическим профилям.

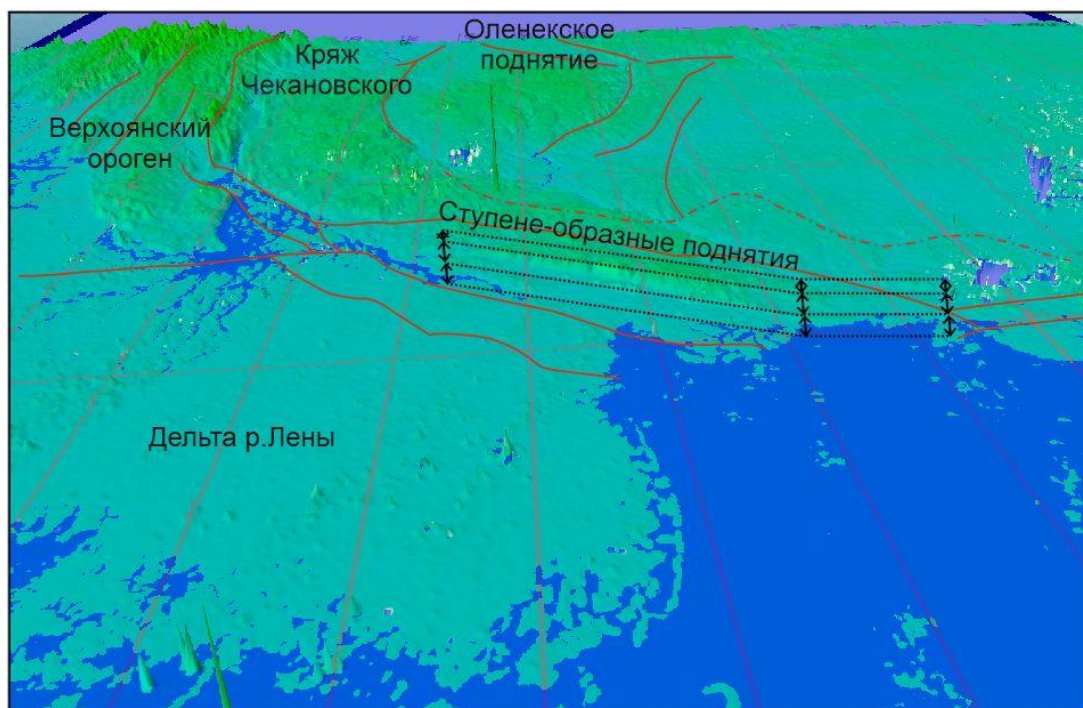


Рис. 3 – Цифровая модель рельефа AsterGDEM. Красные линии – разрывы, пунктиром – погребенные разрывы. Север «смотрит вниз» для перспективы в рельефе

#### *Геодинамические реконструкции.*

Глобально существует два основных геодинамических режима: 1) горизонтальное сжатие и 2) горизонтальное растяжение, связанные с конвергенцией и дивергенцией плит. Ярким примером конвергенции является коллизия Индийской и Евразийской плит.

В настоящем исследовании упоминаются источники внутриплитных напряжений. Природу избыточных горизонтальных напряжений связывают как с давлением от границ литосферных плит, так и с планетарными напряжениями от вращения Земли.

Помимо перечисленных способов реализации внутриплитных напряжений существует объяснение (*Rebetsky, 2008*) остаточных гравитационных напряжений или (ГНС – гравитационное напряженное состояние). Присутствие внутренних литосферных процессов в коре плит может выражаться в виде вертикальных восходящих движений, вызванных выталкивающими силами (например, восходящий тепловой поток) на подошве коры или литосферы. В ходе эрозии и денудации (экзогенных процессов в целом) происходит разгрузка остаточных горизонтальных гравитационных напряжений при эксгумации пород во время воздымания поверхности (*Rebetsky et al., 2017*).

Восстановленные сдвиговые тектонические напряжения хорошо коррелируют с распределением сдвиговых МОЗ.

В области развития северного окончания Кряжа Чекановского (ступене-образные поднятия) (рис. 3) преобладают северо-восточные ориентировки осей сжатия (рис. 4), маркируя последовательное кулисное смещение блоков на запад (требует проверки). Локальные стресс-состояния с северо-восточной ориентировкой отражают наличие диффузной границы плит или попытку хребта Гаккеля продвинуться через шельф моря Лаптевых. Проявляются северо-западные ориентировки ближе к шельфу, в дельте р. Лена. По-видимому, эти определения низшего ранга и зависимы от проявления современной сейсмичности.

В исследовании использованы механизмы очагов землетрясений (МОЗ), анализ которых показал:

1. Из 13 использованных МОЗ 6 сбросовых, 6 сдвиговых, 1 взбросовое.
2. Двигаясь от шельфа вглубь континента определения МОЗ изменяются со сбросовых на сдвиговые;
3. Сбросовые МОЗ связаны с развитием хребта Гаккеля и слабым проявлением рифтовых структур в шельфе.
4. Сдвиговые МОЗ проявляются вдоль разрывных структур с подтвержденной сдвиговой кинематикой.
5. Взбросовый МОЗ приурочен к области поднятия кряжа Чекановского.

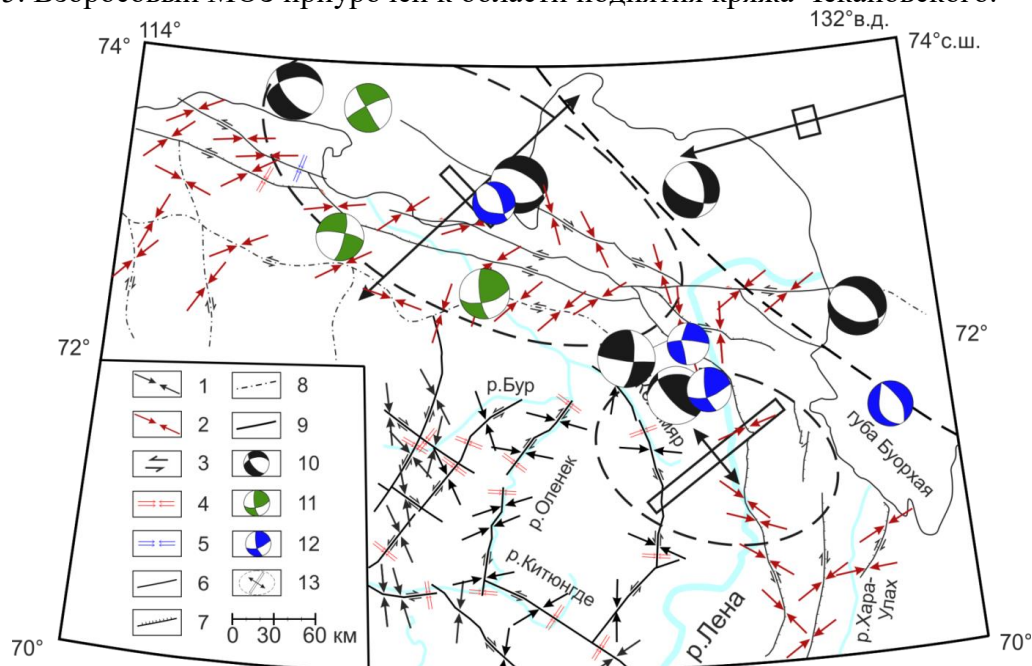


Рис. 4 – Схема геодинамики прибрежной части моря Лаптевых, рассчитанная с помощью SimSGM (Гордеев, 2019)

1 – главные оси сжатия (Сим, 2018); 2 – главные оси сжатия (данное исследование); 3 – направление сдвига; обстановки дополнительного: 4 – сжатия, 5 – растяжения; 6 – разрывы нового исследования; 7 – сброс; 8 – погребенные разрывы; 9 – разрывы (Сим, 2018); механизмы очагов землетрясений: 10 – Imaev et al, 2017; 11 – Grachev et al, 2003; 12 – Engen et al, 2003; 13 – горизонтальные проекции главных осей деформации (растяжение, сжатие) (Imaev et al, 2017)

Восстановленная связь между структурным планом, полем напряжения и современной сейсмичностью дает общую картину геодинамики. Область динамического влияния хребта Гаккеля со стороны Сибирской платформы ограничена тектоническим валом и диффузной границей в области шельфа моря Лаптевых и Верхояно-Колымской складчатости. Регион исследования внутри Сибирской платформы имеет собственные источники напряжений и самостоятельный структурный план, не зависящий от дальнедействующих наведенных напряжений.

*Выводы.* Определено напряженно-деформированное состояние северо-восточной окраины Сибирской платформы:

- Впервые построена подробная схема геодинамики масштаба 1:500 000 на прибрежный район северо-востока Сибирской платформы;
- Выявлено влияние арктического спрединга на прибрежную часть, включая тектонический вал;
- Выявлено унаследованное развитие структуры вала;

- Выявлена особенность распределения МОЗ: сбросовое-сдвиговое; шельф-континент;
- Программное обеспечение SimSGM успешно апробировано на новой территории (проведено сравнение полученной кинематики разрывных структур программным путем с результатами геологической съемки. По трем известным разрывам 100% сходство).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М. : Наука, 1975. – 375 с.
2. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Решение задачи по автоматизации структурно-геоморфологического метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим // Молодежная научно-практическая конференция XVI конференция студенческого научного общества "Современные исследования в геологии", Санкт-Петербург, Россия, 26-28 октября 2018. С. 9-11.
3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. М.: ГЕОС. 2000. С. 227.
4. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Изв. вузов. геол. и разв. / Сим Л.А. 1991. №10. С. 3-22.
5. Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А. Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 771–800. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0371.
6. Engen Ø., Eldholm O. The Arctic plate boundary // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. 2003. V. 108, (B2). P. 2075. doi:10.1029/2002JB001809
7. Grachev A.F. The Arctic rift system and the boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates: New insight to plate tectonic theory // RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES. 2003. V. 5, (5). P. 307-345.
8. Имаева Л., Гусев Г., Имаев В., Мел'никова В. Neotectonic activity and parameters of seismotectonic deformations of seismic belts in Northeast Asia // Journal of Asian Earth Sciences. V. 148. 2017. P. 254-264.
9. Rebetsky Y.L., Sim L.A., Kozyrev A.A. Possible mechanism of horizontal overpressure generation of the Khibiny, Lovozero, and Kovdor ore clusters on the Kola Peninsula // Geology of Ore Deposits. 2017. V. 59, (4). P. 265-280. doi.org/10.1134/S1075701517040043.

#### О НЕОБХОДИМОСТИ НАУЧНОГО БУРЕНИЯ В АРКТИКЕ

*Гусев Е.А., Крылов А.А.*

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. И.С.Граммберга, г. Санкт-Петербург, gus-evgeny@yandex.ru

Северный Ледовитый океан до сих пор остается самым малоизученным глубоководным бассейном. До недавнего времени в высокоширотной Арктике вообще не было ни одной глубокой скважины. Проведенное в 2004 году международное бурение на хребте Ломоносова (IODP-302, ACEX) сразу же дало массу материалов, изучение которых привело к новым открытиям. Целый выпуск престижного международного журнала Nature (vol. 441, 2006) был посвящен результатам исследования керна скважин. Впервые была расшифрована палеоокеанология Арктического бассейна, установлено значительное опреснение океанских вод и подтверждены очень теплые климатические условия, существовавшие в Арктике до олигоценного периода. Были оценены скорости