

## Экспедиции, полевые семинары, практики

### РОССИЙСКО-ГЕРМАНСКИЙ ПРОЕКТ «СЕЙСМИЧНОСТЬ И НЕОТЕКТОНИКА ЛАПТЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА»

#### ВВЕДЕНИЕ

Российско-германское научно-техническое сотрудничество, направленное на изучение Арктического и Дальневосточного регионов России более 20-ти лет успешно развивается в рамках Соглашения о сотрудничестве в области морских и полярных исследований между Федеральным министерством образования и научных исследований Федеративной Республики Германия и Министерством образования и науки Российской Федерации. Примерами этого сотрудничества могут служить такие проекты как «Курило-Охотский Морской Эксперимент» (КОМЭКС), «Лаптевоморский Морской Эксперимент» (ЛАПЭКС) и «Курило-Камчатская и Алеутская системы окраинное море — островная дуга: взаимодействие между геодинамикой и климатом в пространстве и времени» (КАЛЬМАР). Совместные исследования, проводились в дальневосточных и арктических морях России, включая море Лаптевых, Берингово и Охотское моря, а также на п-ве Камчатка (Дулло и др., 2007). С российской стороны в проектах участвовали Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН и ряд других институтов. С германской стороны институтами-партнерами были: Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI), Институт морских исследований им. Лейбница (IFM-GEOMAR), Германский центр исследования Земли (GFZ) и ряд других ведущих научных центров.

Научно-исследовательский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» (СИОЛА) наследует лучшие традиции этого сотрудничества и посвящен исследованию одного из интереснейших регионов Земли, где срединно-океанический спрединговый хребет Гаккеля переходит в континентальную рифтовую зону шельфа моря Лаптевых (рис. 1). Несмотря на то, что геологические и геофизические исследования проводятся в этом регионе давно, остается ряд открытых вопросов, связанных с сейсмич-

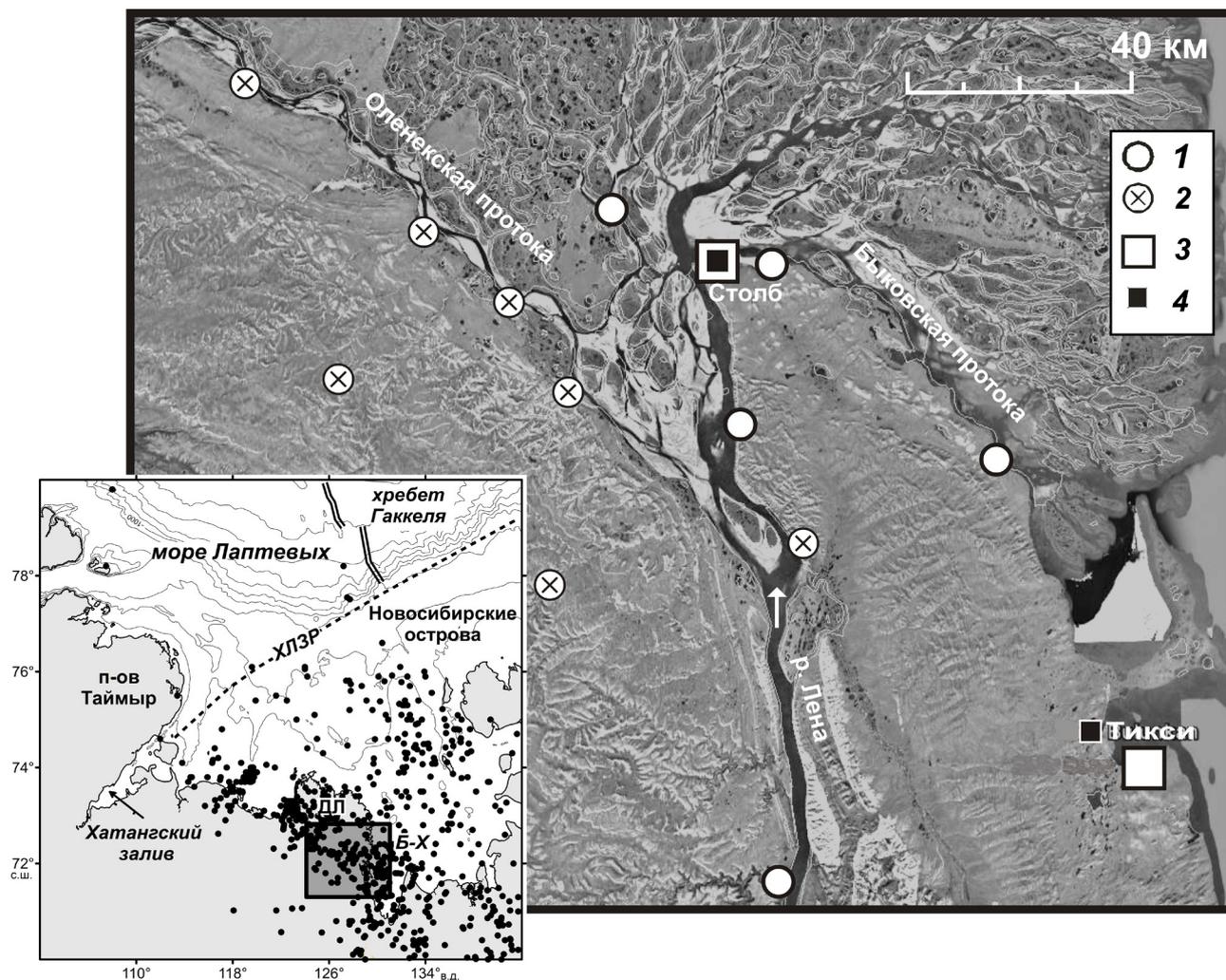
ностью, современной активностью и геодинамикой, что не позволяет с уверенностью выделить некоторые особенности структурного плана данного региона. Проект СИОЛА направлен на решение перечисленных вопросов посредством проведения сейсмологических наблюдений с использованием сети временных сейсмических станций и изучения структурного рисунка современных разломов на суше и в акватории моря Лаптевых.

Исследования в рамках проекта проводятся силами трех основных институтов-партнеров: Институт им. Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (AWI, Бременхафен), Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН, Москва) и Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ЯФ ФИЦ ЕГС РАН, Якутск). В проекте также принимают участие Центр им. Гельмгольца в Потсдаме — GFZ Германский центр исследования Земли (GFZ, Потсдам), Потсдамский Университет (UP, Потсдам) и Федеральный институт геологии и природных ресурсов (BGR, Ганновер).

С германской стороны проект финансируется институтами AWI и GFZ, а с российской стороны работы по проекту ведутся в рамках государственных заданий ИО РАН и ЯФ ФИЦ ЕГС РАН и частично за счет грантов российских научных фондов. Проект СИОЛА рассчитан на 5 лет (2015–2019 гг.), а в случае его успешной реализации это сотрудничество может быть продолжено.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Лаптевоморский сегмент Северного Ледовитого океана, включает акваторию шельфа моря Лаптевых и сопряженные структуры побережья и простирается от Таймырского полуострова на западе до Новосибирских островов на востоке (рис. 1, врезка). В этом районе сочленяются структуры Сибирской платформы, Таймырской, Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской покровно-складчатых систем, формирующие



**Рис. 1.** Карта расположения временных сейсмостанций проекта СИОЛА. В качестве основы использована карта Google Earth. На врезке показано генеральное положение района исследований, отмеченного серым прямоугольником. Черные точки обозначают эпицентры землетрясений, зарегистрированные сетью ЯФ ФИЦ ЕГС РАН с 1962 по 2012 г. ХЛЗР — Хатангско-Ломоносовская зона разломов, ДЛ — дельта Лены, Б-Х — губа Буор-Хая; 1 — станции, расставленные на период с 2017 по 2018; 2 — станции, проработавшие с 2016 по 2017 гг. и демонтированные летом 2017 г.; 3 — группы временных станций проекта СИОЛА; 4 — стационарные сейсмостанции «Тикси» и «Столб».

акустический фундамент, который является тектоническим основанием рифтовой системы моря Лаптевых (Драчев, 2002). К сейсмически активным структурам, с которыми связано формирование окраинно-континентальной кайнозойской рифтовой системы, относятся спрединговый хр. Гаккеля, структура которого в шельфовой области моря Лаптевых сменяется системой рифтовых впадин, контролируемых разломами. Выделяют два типа разломов: субмеридиональные и северо-западные сбросы и субортогональные им сдвиги.

Сбросы ограничивают систему узких грабенов и прогибов северо-западного простирания, имеющих длину до 200–250 км при ширине 40–60 км, а также совокупность подводных поднятий (Грамберг и др., 1990; Драчев, 2000; Franke et al., 2001). Из них наиболее крупным элемен-

том рифтовой системы является Усть-Ленский грабен, которой протягивается на расстояние 400–420 км в меридиональном направлении от южной оконечности губы Буор-Хая. Ширина грабена в северной части достигает 150–170 км и постепенно сужается к югу до 30–40 км. Структура грабена на всем протяжении ограничена сбросами с вертикальной амплитудой до 0.3–1.0 км и он заполнен осадками мощностью до 10 км.

Шельф и южное побережье моря Лаптевых являются сейсмически активными. Наиболее отчетливо здесь выделяются два сейсмических пояса, один из которых протягивается на север от губы Буор-Хая, а второй прослеживается в северо-западном направлении от губы Буор-Хая через дельту р. Лены, мелководные Оленекский и Анабарский заливы моря Лаптевых и далее к полуострову Таймыр. За последние 100 лет

в его пределах было зарегистрировано около 400 землетрясений с энергетическим классом  $K=7-14$  (магнитуда  $M \leq 6$ ), внутри пояса имеется ряд скоплений с повышенной плотностью эпицентров землетрясений (Сейсмогеология ..., 2017). Глубины очагов землетрясений в основном не превышают 25 км на континенте и 10 км под океаном (Franke et al. 2000; Fujita et al. 2009). Немногочисленные работы по регистрации землетрясений в верхней мантии (Ковачев и др., 1994; Avetisov, 1999) дали неоднозначные результаты.

Сейсмические пояса Лаптевоморского региона являются границами между Евразийской и Северо-Американской плитами, полюс вращения которых расположен очень близко к исследуемой области, вероятнее всего к югу от дельты р. Лена. Существующие данные указывают на то, что условия сжатия и растяжения сменяют здесь друг друга в пределах очень небольших расстояний (Gaina et al., 2002).

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Работы по проекту сконцентрированы на трех основных направлениях, первое из которых — регистрация сейсмических событий сетью временных сейсмических станций с целью детального картирования активных разломов.

Вторым направлением является изучение механизмов очагов землетрясений, которое даст возможность уточнить современную геодинамическую обстановку в регионе, то есть установить, где в пределах моря Лаптевых и дельты р. Лена расположены области растяжения и сжатия и где находится полюс вращения между Евразийской и Северо-Американской плитами. Планируется также выявить связь между современной сейсмичностью и ранее существовавшими тектоническими структурами в коре и литосфере (например, Западно-Верхоянский складчато-надвиговый пояс — Оленекская зона или Южно-Ануйская сутура).

Третий важный круг вопросов касается строения литосферы. Представляется интересным тот факт, что, несмотря на наличие кайнозойского континентального рифтинга, проявления вулканической активности в море Лаптевых являются малочисленными. В связи с этим планируется сравнить строение глубинных слоев земной коры и верхней мантии в этом регионе с другими континентальными рифтовыми системами (например, Афарской) с целью углубления наших представлений о движущих процессах, существующих в исследуемом районе.

Кроме того результаты исследований дадут возможность ответить на ряд вопросов, касающихся неотектоники данного региона: является ли в настоящее время рифтовая система моря

Лаптевых активной, затухающей или отмершей; является ли Оленекская разломная зона обновленной разломной зоной или границей плит; какова структура и роль Хатангско-Ломоносовской зоны разломов и как далеко она прослеживается; находится ли море Лаптевых на одной микроплите (Avetisov et al., 1999; Franke et al., 2000) или на двух микроплитах (Drachev, 1998).

### ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период с 2015 по 2017 гг. в рамках проекта был успешно реализован план полевых сейсмологических исследований. В сентябре 2015 г. были проведены полевые работы по выбору мест для постановки сейсмостанций в районе поселка Тикси и дельты р. Лена (рис. 1). Исследованиями были охвачены районы вдоль Оленекской и Быковской протоков, и вдоль основного русла р. Лена вверх по течению на расстояние в 140 км. Эти районы представляют интерес для сейсмологических наблюдений, поскольку по геологическим и геофизическим данным здесь происходит сочленение разломов двух направлений: субмеридионального вдоль р. Лена и северо-западного, протягивающегося от о. Столб, вдоль Оленекской протоки (Сейсмогеология ..., 2017).

Летом 2016 г. во время полевых работ в выбранных ранее районах было установлено 12 сейсмостанций. Сеть из 13 станций была установлена к юго-востоку от поселка Тикси специально для регистрации локальных землетрясений в районе губы Буор-Хая (рис. 1). Конфигурация каждой станции включала рекордер DATA-CUBE, сейсмометр MARK L4 1Hz и элемент питания. Эта первая расстановка была осуществлена для того, чтобы протестировать конфигурацию сейсмостанций в суровых условиях севера и получить первый набор данных.

Летом 2017 г. были проведены осмотр и профилактика всех установленных сейсмических станций, считывание зарегистрированных данных и сохранение их в цифровом виде на твердых носителях для дальнейшей обработки. Первичный анализ полученных данных показал, что все 25 станций работали в течение девяти месяцев и зарегистрировали большой объем информации, который наряду с записью сейсмических событий, включал измерение температуры. Для части станций осуществлялась постоянная привязка к точному времени и GPS координатам. Большинство станций работало без сбоев, несмотря на экстремальные климатические условия (температура на отдельных станциях опускалась до отметки  $-26^{\circ}\text{C}$ ), лишь на нескольких станциях произошли незначительные неполадки. Регистрация данных



**Рис. 2.** Конфигурация сети из трех временных станций проекта СИОЛА вблизи стационарной сеймостанции «Столб».

на большинстве станций прекратилась в конце апреля – начале мая, поскольку объем памяти устройств CUBE ограничен 32 Гб. Все станции из расстановки в Оленекской протоке и одна станция в основном русле р. Лена были демонтированы для того, чтобы оптимизировать планы экспедиционных работ в 2018 г. Вместо этого три станции были размещены в виде небольшой сети около стационарной станции «Столб» (рис. 2).

Полученные данные были переданы в распоряжение всех институтов-партнеров для дальнейшей обработки. Предварительный анализ небольшой части данных показывает, что станции регистрировали реальные сейсмические события, частота возникновения которых за первые 4 дня составляла одно землетрясение в сутки. Есть все основания полагать, что полученный экспедиционный материал позволит решить основные задачи проекта и лучше понять роль Лаптевоморского региона в геодинамике Арктики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект СИОЛА ставит перед собой важные научные задачи и успешное начало совместных работ в рамках проекта позволяет надеяться, что его вклад в изучение неотектоники Лаптевоморского региона будет весомым и получит международное признание. Уточнение представлений о геодинамической обстановке на этом сейсмоактивном участке границы между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами, имеет огромное значение для понимания современной геодинамики Арктики и Дальнего Востока и вносит важный вклад в решение проблемы защиты от природных катастроф.

Реализация проекта служит основной цели российско-германского научно-технического сотрудничества — внести коллективный вклад в решение проблемы рационального природопользования в системе планеты Земля. Стороны проекта СИОЛА надеются, что его реализация будет способствовать дальнейшему укреплению сложившихся за долгие годы работы в рамках

различных проектов научных связей и тесного сотрудничества между ведущими российскими и германскими учеными.

Авторы выражают благодарность Франку Крюгеру (Frank Krueger), Даниэлю Волмеру (Daniel Vollmer), Юланду Асанжу (Joelund Asseng), Софии-Катерине Куфнер (Sofia-Katerina Kufner), принимавшим участие в полевых работах, а также Вальдемару Шнайдеру (Waldemar Schneider), Майку Хенигу (Mike Hoenig), Карлу-Хайнцу Джекелу (Karl-Heinz Jaeckel), Мартину Хакстеру (Martin Haxter), за техническую поддержку и помощь в организации работ по проекту.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № 0149-2018-0015. Участие российской стороны в экспедиционных работах частично финансировалось за счет гранта РФ №14-50-00095.

## Список литературы

- Грамберг И.С., Деменицкая Р.М., Секретов С.Б.* Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Гаккеля – Момского рифта // ДАН. 1990. Т. 311. № 3. С. 689–694.
- Гусев Е.А., Зайончек А.В., Мэннис М.В. и др.* Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля. Геолого-геофизическая характеристика литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 40–54.
- Драчев С.С.* Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. № 6. С. 43–56.
- Драчев С.С.* О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60–76.
- Дулло В.-К., Ван ден Богаарт К., Баранов Б.В., Селиверстов Н.И.* Российско-германский проект «КАЛЬМАР»: Комплексные исследования Курило-Камчатской и Адеутской зон субдукции // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. № 10. С. 165–170.
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Соловьев С.Л.* Кратковременное изучение микросейсмичности губы Буор-Хая, Море Лаптевых, с помощью

- донных сейсмографов // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 65–76.
- Сейсмоструктура северо-восточного сектора Российской Арктики / отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников. Ин-т земной коры СО РАН, Ин-т геологии алмаза и благородных металлов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 134 с.
- Avetisov G.P.* Geodynamics of the zone of continental continuation of Mid-Arctic earthquakes belt (Laptev Sea) // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1999. V. 114. P. 59–70.
- Drachev S.S.* Laptev Sea Rifted Continental Margin: Modern Knowledge and Unsolved Questions // *Polarforschung*. 1998. V. 68. P. 41–50.
- Franke D., Krüger F., Klinge K.* Tectonics of the Laptev Sea – Moma ‘Rift’ Region: Investigation with Seismologic Broadband Data // *Journal of Seismology*. 2000. V. 4. P. 99–116.
- Franke D., Hinz K., Oncken O.* The Laptev Sea Rift // *Marine and Petroleum Geology*. 2001. V. 18. P. 1083–1127.
- Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G. et al.* Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // *Stephan Mueller Special Publication Series*. 2009. V. 4. P. 117–145.
- Gaina C., Roest W.R., Müller R.D.* Late Cretaceous-Cenozoic deformation of northeast Asia // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 197. P. 273–286.
- В.Х. Гайсслер*, Институт им. Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований им. Гельмгольца, Германия;
- Б.В. Баранов*, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН;
- С.В. Шибяев*, Якутский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН;
- К. Хаберланд*, Центр им. Гельмгольца в Потсдаме, GFZ Германский центр исследования Земли, Германия;
- Н.В. Цуканов*, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН;
- К.А. Дозорова*, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН