

© Коллектив авторов, 2018

УДК 550.34

А.А.Крылов^{1,2}, С.А.Ковачев¹, В.Х. Гайсслер³, Б.В.Баранов¹

ПРОЕКТ «СЕЙСМИЧНОСТЬ И ГЕОТЕКТОНИКА ЛАПТЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА (СИОЛА)»: ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВРЕМЕННОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия;

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия;

³ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия

Целью настоящей работы является описание эксперимента со временными сейсмо-станциями в районе дельты р. Лена в рамках проекта СИОЛА с предварительной оценкой эффективности работы этой сети. Обработан тестовый объем записей кампании 2016-2017 гг. Сделан вывод о том, что шумовая обстановка в районе расстановки сейсмостанции в целом удовлетворительная, за исключением наличия большого количества коротких высокоамплитудных импульсных помех неясной природы. Применяемые автоматизированные алгоритмы детектирования позволяют обнаружить несколько сотен землетрясений в месяц. В пределах 300 км от центра локальной сети надежно регистрируются события с магнитудой от 0 до 3. Анализ ошибок локализации эпицентров показал, что для локальных землетрясений (до 300 км от центра сети) определение эпицентра по локальной сети приводит к меньшим ошибкам, чем по сейсмогруппе, которая может использоваться для больших расстояний.

Ключевые слова: сейсмичность, море Лаптевых, дельта Лены, локальная сеть сейсмографов, малоапертурная сейсмогруппа, эпицентры землетрясений, магнитуда землетрясений, автоматическое детектирование.

A.A. Krylov^{1,2}, S.A. Kovachev¹, W. Geissler³, B.V. Baranov¹

«SEISMICITY AND NEOTECTONICS OF THE LAPTEV SEA REGION» PROJECT (SIOLA): EFFICIENCY EVALUATION OF TEMPORARY LOCAL SEISMIC NETWORK IN LENA DELTA.

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia

³ Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

The purpose of this work is to describe the experiment with temporary seismic stations in delta area of the Lena river as part of SIOLA project and to perform preliminary efficiency evaluation of this network. The test volume of records obtained in 2016-2017 years campaign was processed. It was concluded that investigated area is generally not very noisy, except for the presence of a large number of short high-amplitude spikes with unclear nature. An automated detection algorithm applied to the records allows detecting of several hundred earthquakes a month. Within 300 km from the center of the local network events with a magnitude from 0 to 3 are reliably recorded. An analysis of epicenters localization errors revealed that for local earthquakes (up to 300 km from the center of the network) the determination of the epicenters with local network records leads to less errors than with seismic array, which can be used for longer distances.

Key words: seismicity, Laptev sea, Lena Delta, local seismic network, seismic array, earthquake epicenters, earthquake magnitude, automated detection.

Введение

Район моря Лаптевых является уникальным в том отношении, что область шельфа рассматривается как переходная зона между срединно-океаническим рифтовым хребтом Гаккеля и континентальным Момским рифтом. Это определяет интерес к изучению геодинамики региона Лаптево-морского шельфа и его окрестностей [5].

В то же время, помимо работы нескольких стационарных сейсмостанций Якутского филиала Геофизической службы РАН в районе поселка Тикси, региональных инструментальных сейсмологических исследований в Лаптево-морском регионе было проведено лишь несколько: экспедиции ПГО «Севморгеология» в 1972-1976 гг. (район Новосибирских островов) [1] и 1985-1988 гг. (дельта р. Лена и побережье губы Буор-Хая) [2], а также сейсмологический эксперимент с донными сейсмографами в губе Буор-Хая [5].

В настоящее время действует совместный российско-германский Научно-исследовательский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптево-морского региона» (СИОЛА), в рамках которого в дельте реки Лена и окрестностях поселка Тикси развернута временная сеть сейсмостанций [4]. Проект нацелен на картирование активных разломов с помощью регистрации сейсмических событий, изучение механизмов формирования очагов землетрясений для уточнения современной геодинамической обстановки в регионе, а также изучение глубинных слоев земной коры и верхней мантии.

Целью настоящей работы является описание эксперимента со временными сейсмостанциями в районе дельты р. Лена (кампания 2016-2017 гг.) с предварительной оценкой представительности методов и результатов эксперимента, основанной на первых полученных данных.

Описание сети сейсмостанций.

Летом 2016 г. в районе дельты р. Лена установлена локальная сеть из 12 сейсмостанций. Еще 13 сейсмостанций были расположены к юго-востоку от поселка Тикси в качестве малоапертурной сейсмогруппы (рис. 1).

В эксперименте используются сейсмодатчики Mark L-4 с собственной частотой 1 Гц и регистраторы CUBE, частота дискретизации 100 Гц, объем доступной памяти на каждой автономной сейсмостанции – 32 Гб. Несмотря на суровые климатические условия установленное оборудование успешно проработало около 9 месяцев до того момента, когда свободное пространство

на картах памяти автономных регистраторов иссякло.

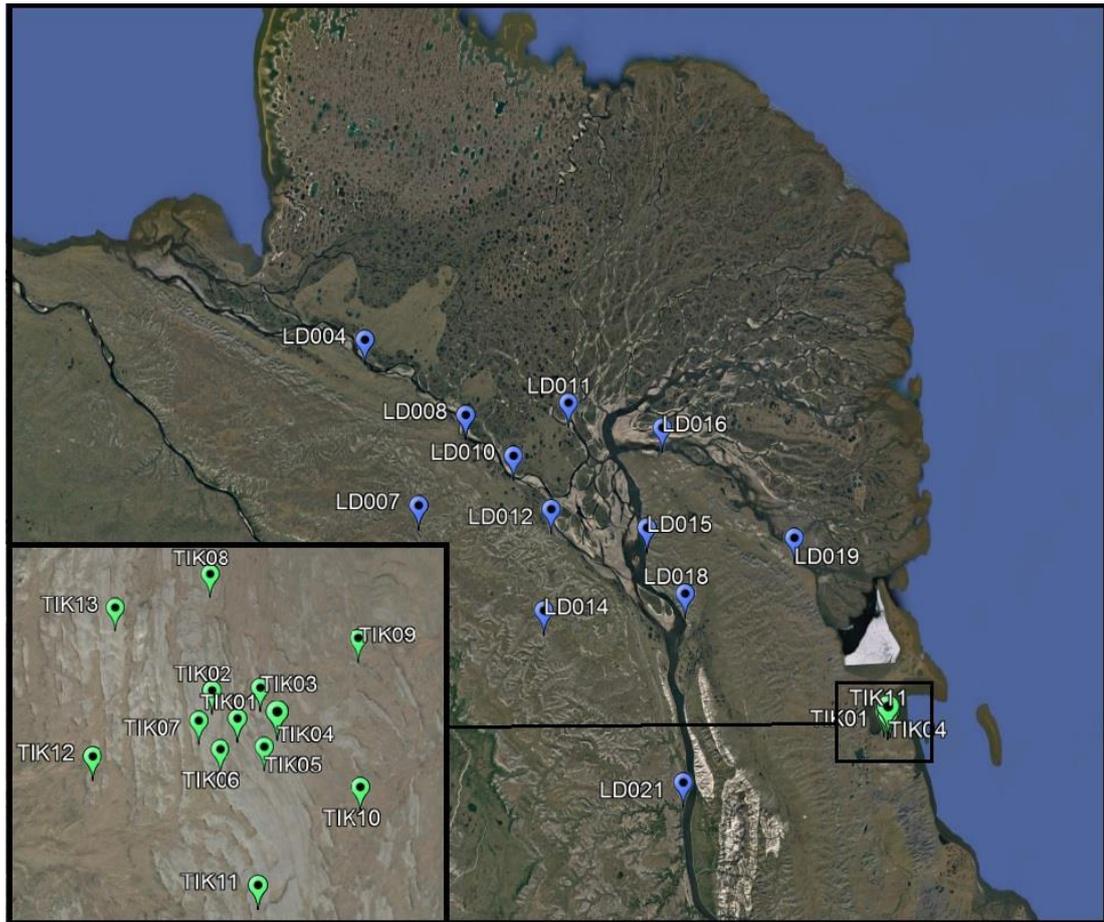


Рис. 1. Расположение временных сетей сеймостанций проекта СИОЛА (кампания 2016-2017 гг.).

Обозначения: синие значки – локальная сеть в дельте р. Лена; зеленые значки - малоапертурная сейсмогруппа в окрестностях поселка Тикси.

Обработка тестовых объемов записей.

Записи, получаемые в сейсмологических экспериментах в море и береговой зоне, зачастую осложнены шумами, обладающими целым рядом особенностей. В целом, оценка уровня шумов с помощью вычисления спектральной плотности мощности PSD (рис. 2) для записей сеймостанций показала, что кривая PSD лежит близко к кривой NLNM (New Low Noise Model) [14] и повторяет ее форму. Это говорит о хорошем выборе точек для установки станций и отсутствии сильных стационарных антропогенных шумов.

Вместе с тем наблюдается большое количество высокоамплитудных коротких импульсных сигналов. Такие сигналы характерны при регистрации в море или береговой зоне и сильно осложняют процесс автоматизированного детектирования землетрясения, особенно, в случае изучения слабой локальной сейсмичности (рис. 3)

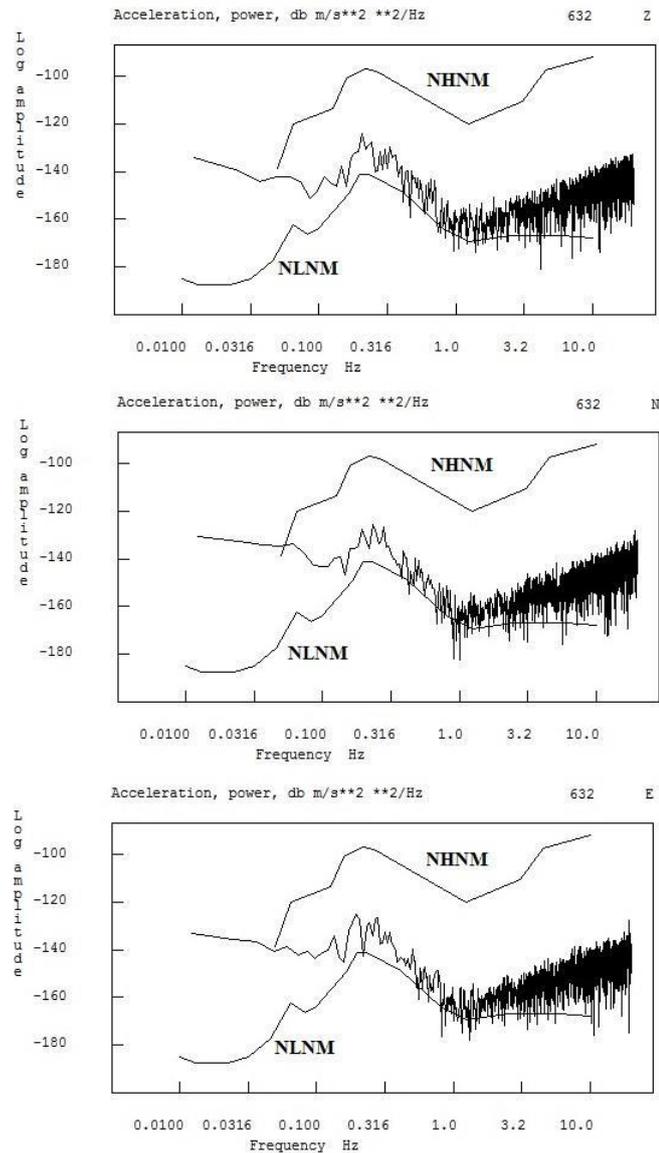


Рис. 2. Кривые спектральной плотности мощности шума PSD для трех компонент (Z, N, E) станции ТИК01 в сравнении с кривыми N1NM (New High Noise Model) и NLNM (New Low Noise Model) [14].

Природа таких сигналов в море и на суше до конца не ясна. В результате ряда донных экспериментальных исследований [6] сделан вывод о том, что основная масса микротолчков может быть связана с проседанием дна в окрестности сейсмографа вследствие разрядки напряжений, существующих в донных породах до постановки прибора и вызванных его ударом и весом после постановки. В этом же исследовании указывается, что даже спустя долгое время после установки сейсмографа на дно наблюдается значительное фоновое число микротолчков, которые могут быть как биологического происхождения [10], так и связанные с механическими свойствами донных пород под сейсмографами.

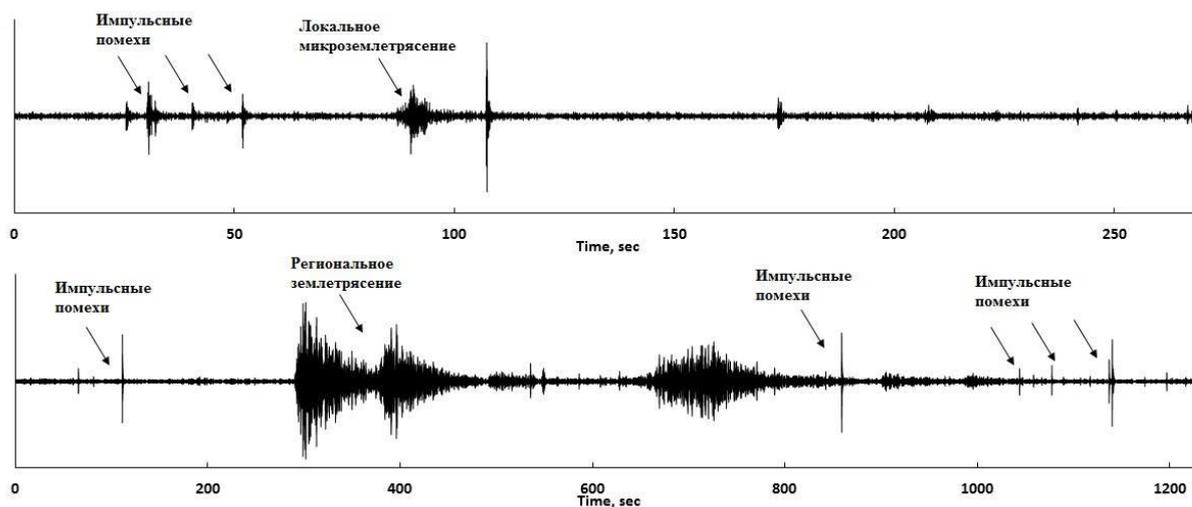


Рис. 3. Примеры полезных сигналов от землетрясений на фоне импульсных шумовых сигналов.

В отдельных работах указывается, что на суше такие импульсные сигналы, обычно, инструментальной природы, но могут быть и сейсмической [16]. Некоторые авторы связывают появление похожих сигналов на сейсмических записях с локальными микроземлетрясениями, вызываемыми хрупким разрушением напряженных скальных пород вследствие прохождения поверхностных волн удаленных сильных землетрясений или изменения давления жидкости внутри искусственных каверн.

При обработке записей для автоматизированного детектирования сигналов от землетрясений использовался разработанный авторами настоящего исследования алгоритм обнаружения полезных сейсмических сигналов, основанный на совместном использовании следующих критериев для детектирования: увеличение амплитуды сигнала, корреляция по разным сейсмостанциям, длительность сигнала.

Обнаружение сигнала по «амплитудному» признаку производилось с помощью распространенного метода, так называемого STA/LTA, при котором вычисляется отношение средних значений некоторой характеристической функции CF в скользящих коротком (short-term-average, STA) и длинном временных окнах (long-term-average, LTA).

В качестве характеристической функции бралась мощность сигнала, интервал длинного окна составлял 30 секунд, а короткого – 1 секунду, порог детектирования – 10. Расчеты проводились по одной из горизонтальных компонент записи (предварительно пропущенной через цифровой фильтр с полосой пропускания от 6 до 16 Гц) с применением техники распараллеливания

расчетов.

Алгоритмы семейства STA/LTA хорошо реагируют на изменение амплитуды сигнала. На записях, в которых присутствуют высокоамплитудные импульсные шумы, они не могут быть использованы в исходном виде. Поэтому после получения фрагментов записей возможных полезных сигналов проведен анализ корреляции времен срабатывания алгоритма STA/LTA на всех сейсмостанциях, а также анализ длительности сигналов с помощью кумулятивной огибающей [8]. На следующем этапе обработки оператором производился визуальный осмотр и классификация отобранных волновых форм.

В результате детектирования тестового объема данных (1 месяц) получили 545 событий, зарегистрированных с помощью локальной сети в дельте р. Лена и классифицированных как землетрясения. На записях сейсмогруппы зарегистрировано 297 таких событий. В дальнейшем для 80 обнаруженных локальных событий, надежно зарегистрированных минимум тремя станциями, вручную проведено выделение первых вступлений Р- и S-волн. Достоверность определений их времен прихода контролировалась графиком Вадати.

Координаты эпицентров, глубины очагов, время в очаге землетрясения местных землетрясений определялись с помощью программы NYPO-71 [12]. Эта программа основана на алгоритме инверсии времен пробега сейсмических волн, являющемся предпочтительным ввиду его большей точности по сравнению с определением расположения гипоцентра по одной трехкомпонентной записи.

Для расчета магнитуд землетрясений использовалась длительность записи сигналов (τ). Эта методика разработана Е. Бистричани [9] и широко используется в международной сейсмологической практике [12].

Соотношения между M_L и τ имеет следующий вид:

$$M_L = 3.24 \log(\tau) - 3.84, \quad (1)$$

где τ – длительность коды сигнала землетрясения, то есть время между приходом первого вступления продольной волны и время, когда амплитуда коды не более чем в 1,5 раз превышает амплитуду фонового сейсмического шума. Это соотношение получено в результате серии экспериментов с донными сейсмографами в районе о. Крит в Эгейском море [7, 11]

Заданная для расчетов скоростная модель среды (для острова Муостах [3]) приведена в таблице 1. На рисунке 4 представлена карта эпицентров 80-

ти локализованных локальных землетрясений (магнитуда M_L от 0.4 до 3.3).

Таблица 1. Скоростная модель среды, использованная при локализации гипоцентров [3]

Слой	Мощность слоя, км	Скорость, км/с	
		P-волны	S-волны
Слабо уплотненные осадки чехла	3	3	-
Терригенные отложения Mz-Kz	5	4.3	-
Терригенные отложения Pz ₂ -Pz ₃	4	5.6	-
Терригенно-карбонатный комплекс Ptz ₃ -Pz ₂	6	6.5	-
"Базальт"	9	7.2	-
Аномальная мантия	18	7.5	4.3
Нормальная мантия	200	8.1	4.7

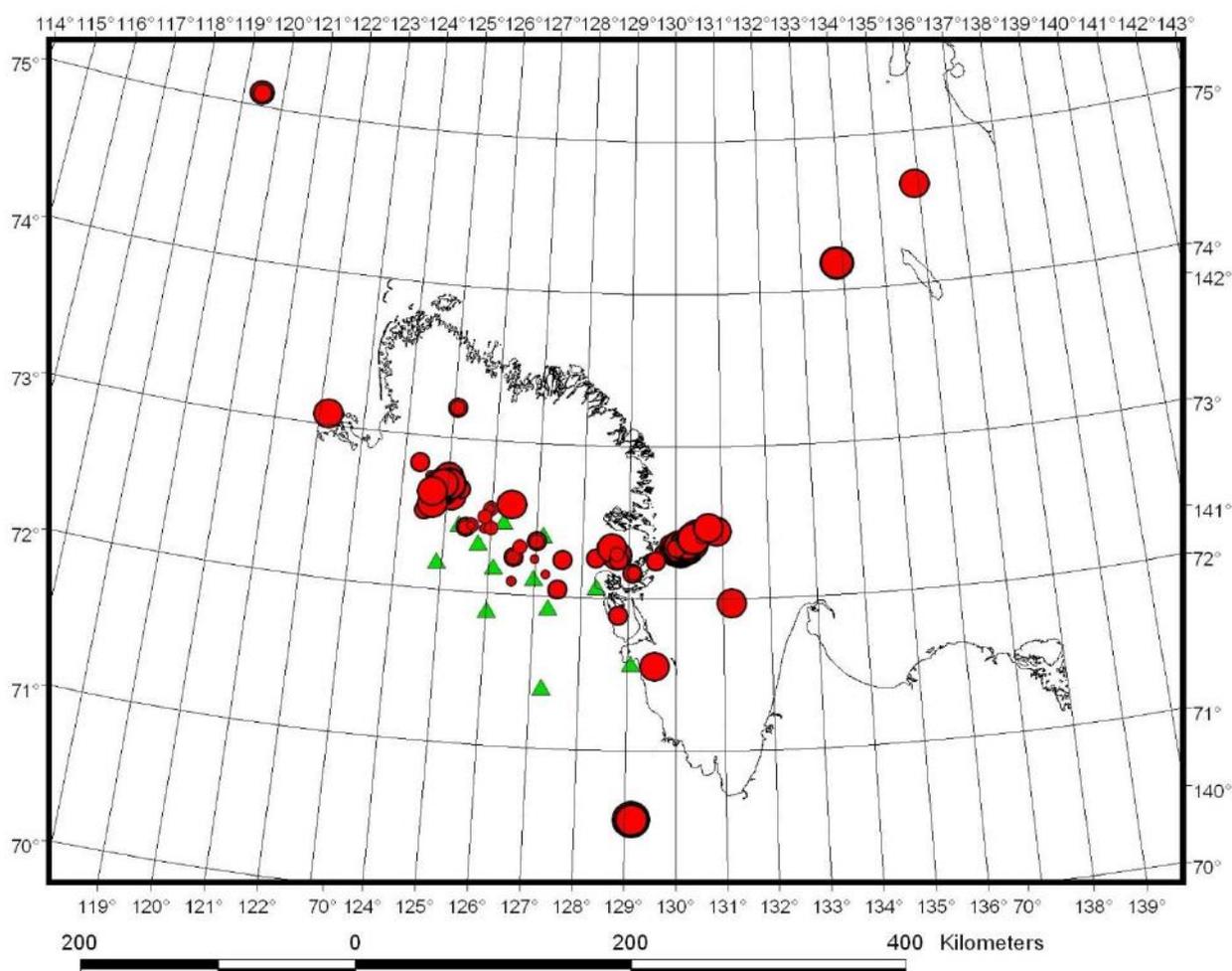


Рис. 4. Распределение эпицентров тестовых 80-ти локальных микроземлетрясений (красные кружки). Зеленые треугольники - сейсмостанции.

Для предварительной оценки чувствительности сети использовались зависимости магнитуд реально зарегистрированных сейсмических сигналов от эпицентральных расстояний. На рисунке 5 показана схема, демонстриру-

ющая дальность регистрации сейсмических событий разной магнитуды на разных эпицентральных расстояниях локальной сетью сейсмических станций в дельте р. Лена.

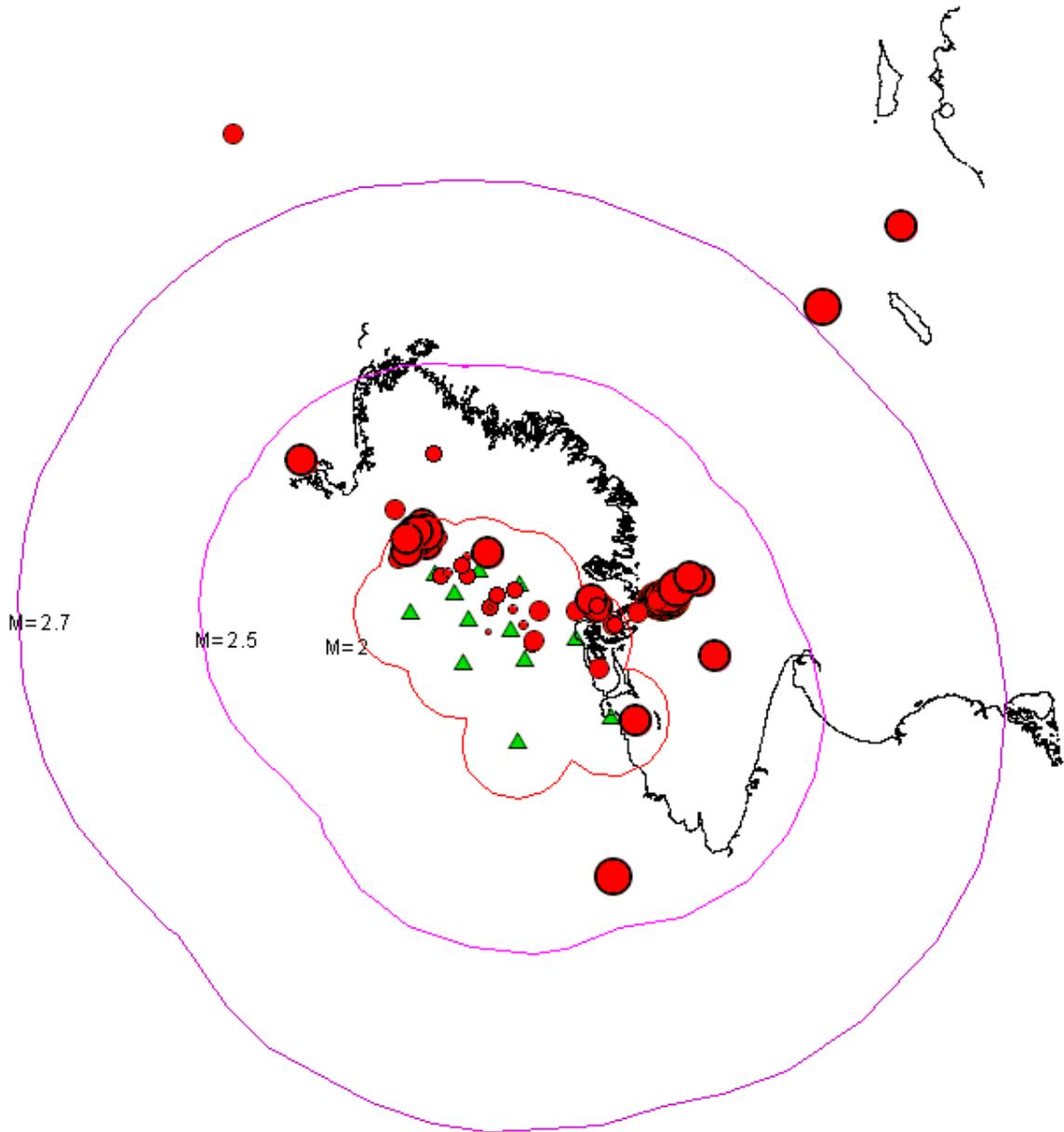


Рис. 5. Схема, демонстрирующая дальность регистрации сейсмических событий разной магнитуды на разных эпицентральных расстояниях локальной сетью сейсмических станций в дельте р. Лена.

Схема построена с учетом того, что каждый сейсмический сигнал определенной магнитуды должен быть зарегистрирован минимум тремя сейсмографами, а также с допущением, что все сейсмические станции сети имеют одинаковую чувствительность. В реальности это не так, поэтому схема имеет достаточно условный характер, но она базируется на анализе фактиче-

ской сейсмологической информации, полученной в дельте р. Лена.

Для 30 локальных землетрясений проведено сравнение ошибок локализации с помощью алгоритма НУРО-71 по записям локальной сети и с помощью f-k анализа [15] и программы НУРОCENTER [13] (по азимуту) записей тех же событий, зарегистрированных с помощью сейсмогруппы. Рассчитанная ошибка локализации в плане, определенная по НУРО-71, варьируется от 1.5 до 31 км, в то же время рассчитанная ошибка локализации, определенная по f-k анализу и НУРОCENTER, лежит в диапазоне от 2.5 до 94 км в широтном направлении и от 14 до 180 км в меридиональном направлении. Таким образом, можно прийти к выводу, что для локальных землетрясений (до 300 км от центра сети) определение гипоцентра по локальной сети приводит к меньшим ошибкам, чем по сейсмогруппе, которая может использоваться для больших расстояний.

Заключение

Проект СИОЛА нацелен на решение ряда важных научных задач, касающихся сейсмологической и геодинамической обстановки в лаптевоморском регионе. Первый этап инструментальных наблюдений завершен успешно, получен большой объем сейсмологических записей, требующий длительного и углубленного анализа.

Первый тестовый объем обработанных данных показал, что регистрируется масса локальных слабых сейсмических событий. Шумовая обстановка в районе расстановки сейсмостанции в целом удовлетворительная, за исключением наличия большого количества коротких высокоамплитудных импульсных помех неясной природы. Применяемые автоматизированные алгоритмы детектирования позволяют обнаружить несколько сотен землетрясений в месяц.

В пределах 300 км от центра локальной сети надежно регистрируются события с магнитудой от 0 до 3. После процедуры восстановления низкочастотных компонент возможно обнаружение и определение основных параметров более отдаленных региональных событий по трехкомпонентным записям отдельных сейсмографов и сейсмогруппы.

Анализ ошибок локализации гипоцентров показал, что для локальных землетрясений (до 300 км от центра сети) определение гипоцентра по локальной сети приводит к меньшим ошибкам, чем по сейсмогруппе, которая может использоваться для больших расстояний.

В целом, инструментальные исследования в рамках проекта по результатам реализации первого этапа можно признать успешными и перспективными.

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 Джекеу (Karl-Heinz Jaeckel), Мартину Хакстеру (Martin Haxter), за техническую поддержку и помощь в организации работ по проекту.

(Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания № 0149-2018-0015 и государственной программы повышения конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации среди ведущих мировых научно-образовательных центров (программа 5-100) при частичной поддержке РФФИ (проект №14-50-000954; Анализ полученных экспериментальных данных о гипоцентрах и магнитудах зарегистрированных сейсмических событий), РФФИ (проекты № 18-35-00474 мол_а и 17-05-41144 РГО_а; Определение основных параметров землетрясений и составление базы волновых форм), Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук и докторов наук; проект МК-5963.2018.5; Автоматизированное детектирование сейсмических событий).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисов Г.П. Сейсмичность моря Лаптевых и ее связь с сейсмичностью Евразийского бассейна. Тектоника Арктики. Л. 1975. 1: 31-36.
2. Аветисов Г.П. Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления. Вулканология и сейсмология. 1991а. 6: 59-69.
3. Аветисов Г.П. Глубинное строение района дельты Лены по сейсмологическим данным. Советская геология. 1991б. 4: 73-81.
4. Гайсслер В.Х., Баранов Б.В., Шибяев С.В., Хаберланд К., Цуканов Н.В., Дозорова К.А. Российско-германский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона». Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. 1: 102-106.
5. 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: 65-76.
6. Островский А.А. Донные сейсмоэксперименты. М.: Наука, 1998. 255 с.
7. Соловьев С.Л., Ковачев С.А., Кузин И.П., Воронина Е.В. Микросейсмичность Эгейского и Тирренского морей по наблюдениям донных сейсмографов. М.: Наука. 1993. 160 с.
8. Baranov S.V. Application of the wavelet transform to automatic seismic signal detection. Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2007. 43 (2): 177-188.
9. Biszrichany E. A new method for determination of the magnitude earthquake. Geofis. Kbz. 1958. 7 (2).
10. Brocher T.M., Iwatake B.T. Sources of Low-Frequency Seafloor Noise on a Continental Shelf. Bulletin of Seismological Society of America. 1982. 72: 1129-1142.
11. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Shoda O.Yu., Soloviev S.L. Attenuation of S-waves in the lithosphere of the Sea of Crete according to OBS observation. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1991. 69: 101-111.
12. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYPO71 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-311. 1975. 116 p.

13. Lienert B.R.E and Havskov J. A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*. 1995. 66: 26-36.
14. Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File report. 1993. 93-322. 95p.
15. Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Kværna T. Seismic Arrays. *New Manual of Seismological Observatory Practice – NMSOP*. Chapter 9. 2009. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP_r1_ch9.
16. Trnkoczy A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *New Manual of Seismological Observatory Practice (2002), revised version*. 2012. 20 p.

Получена 14.09.2018

(Контактная информация: Крылов Артём Александрович – к.ф.-м.н., научный сотрудник ИО РАН; адрес: 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36; тел. +7 (909) 978 26 79; e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru;

Ковачев Сергей Анатольевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИО РАН; адрес: 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36; тел. +7 (916) 235 40 29; e-mail: kovachev@ocean.ru)

LITERATURA

1. Avetisov G.P. Sejsmichnost' morya Laptevyyh i ee svyaz' s sejsmichnost'yu Evrazijskogo bassejna. *Tektonika Arktiki*. L. 1975. 1: 31-36.
2. Avetisov G.P. Gipocentriya i fokal'nye mekhanizmy zemletryasenij del'ty r. Leny i ee obramleniya. *Vulkanologiya i sejsmologiya*. 1991a. 6: 59-69.
3. Avetisov G.P. Glubinnoe stroenie rajona del'ty Leny po sejsmologicheskim dannym. *Sovetskaya geologiya*. 1991b. 4: 73-81.
4. Gajssler V.H., Baranov B.V., SHibaev S.V., Haberland K., Cukanov N.V., Dozorova K.A. Rossijsko-germanskij proekt «Sejsmichnost' i neotektonika Laptevomorskogo regiona». *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2018. 1: 102-106.
5. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Solov'ev S.L. Kratkovremennoe izuchenie mikro-sejsmichnosti guby Buor-Haya, more Laptevyyh, s pomoshch'yu donnyh sejsmografov. *Fizika Zemli*. 1994. 7-8: 65-76.
6. Ostrovskij A.A. Donnye sejsmoehksperimenty. M.: Nauka, 1998. 255 s.
7. Solov'ev S.L., Kovachev S.A., Kuzin I.P., Voronina E.V. Mikro-sejsmichnost' EHgejskogo i Tirrenskogo morej po nablyudenyam donnyh sejsmografov. M.: Nauka. 1993. 160 s.
8. Baranov S.V. Application of the wavelet transform to automatic seismic signal detection. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2007. 43 (2): 177-188.
9. Biszrichany E. A new method for determination of the magnitude earthquake. *Geofis. Kbzl*. 1958. 7 (2).
10. Brocher T.M., Iwatake B.T. Sources of Low-Frequency Seafloor Noise on a Continental Shelf. *Bulletin of Seismological Society of America*. 1982. 72: 1129-1142.
11. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Shoda O.Yu., Soloviev S.L. Attenuation of S-waves in the lithosphere of the Sea of Crete according to OBS observation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1991. 69: 101-111.
12. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYPO71 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-311. 1975. 116 p.
13. Lienert B.R.E and Havskov J. A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*. 1995. 66: 26-36.
14. Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File report. 1993. 93-322. 95p.
15. Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Kværna T. Seismic Arrays. *New Manual of Seismo-*

logical Observatory Practice – NMSOP. Chapter 9. 2009. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP_r1_ch9.

16. Trnkoczy A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. New Manual of Seismological Observatory Practice (2002), revised version. 2012. 20 p.

Образец ссылки на статью:

Крылов А.А., Ковачев С.А., Гайсслер В.Х., Баранов Б.В. Проект «Сейсмичность и геотектоника Лаптевоморского региона (СИОЛА)»: оценка эффективности временной сейсмологической сети в дельте р. Лена. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2018. 3: 11 с. [Электр. ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2018-3/Articles/KAA-2018-3.pdf>). DOI: 10.24411/2304-9081-2018-13004.