

УДК 550.348, 550.34.03, 550.34.06

Результаты первичной обработки данных инфразвуковой группы на острове Валаам

© 2019 г. В.В. Карпинский^{1,2}, В.Э. Асминг³

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия;

³КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия

Аннотация. Приведена первичная обработка данных инфразвуковой группы, установленной на о. Валаам. Описаны принципы работы нового быстрого акустического детектора. С помощью детектора выявлены акустические события по данным с июня 2016 г. по декабрь 2018 года. Проанализировано распределение направлений на источники сигнала в зависимости от времени.

Ключевые слова: инфразвук, бронтиды, инфразвуковой детектор, Валаам.

Для цитирования: Карпинский В.В., Асминг В.Э. Результаты первичной обработки данных инфразвуковой группы на острове Валаам // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.08>

Введение

Необычные низкочастотные явления — гулы (бронтиды), бурление воды на Ладожском озере люди наблюдали очень давно. Первые подробные описания гулов, подземных толчков сделал в начале XX в. монах Валаамского монастыря Иувиан (в миру И.П. Краснопёров) [Ассиновская, Никонов, 1998; Ассиновская, 2005; Ассиновская и др., 2009]. Происхождение таких гулов обычно связывают либо с сейсмичностью, либо с эманацией газов со дна Ладожского озера. Доказательств или опровержений предлагаемых гипотез не существует во многом из-за того, что до недавнего времени инструментальной регистрации этих явлений не производилось. С июня 2006 г. на Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам непрерывно работает сейсмическая станция VALR, которая способна регистрировать очень слабую локальную и региональную сейсмичность [Карпинский, 2016]. В 2016 г. было принято решение дополнить сейсмические наблюдения акустическими. В июне того же года была развернута инфразвуковая группа VALS, разработанная в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН [Асминг и др., 2012] (рис. 1). Она снабжена тремя разнесёнными низкочастотными микрофонами, привязка по времени осуществляется с помощью GPS. Непрерывные данные с частотой дискретизации 100 Гц сохраняются на компьютере сбора. Сведения о сейсмостанции VALR и инфразвуковой группе VALS приведены в таблице.



Рис. 1. Расположение сейсмостанции VALR и инфразвуковой группы VALS на о. Валаам

Большой проблемой регистрации бронтид является отсутствие единого понимания, что собственно подразумевается под понятием бронтиды, какими свойствами присущи этим явлениям, но на начальном этапе необходимо выделить и отбросить события, имеющие известное происхождение. Задача осложняется тем, что в последние десятилетия значительно увеличилось количество техногенных источников акустических сигналов: карьерные взрывы, самолёты, вертолёт, корабли и т.д. Из известных естественных источников акустических сигналов в первую

Таблица. Сведения о сейсмостанции VALR и инфразвуковой группе VALS

Станция		код	Дата открытия (модернизации)	Координаты и высота над уровнем моря			Подпочва	Тип оборудования
название станции и код сети	международный			региональный	φ, °N	λ, °E		
Валаам	VALR	VALR	18.06.2006	61.361	30.887	24	Габбродолерит	СМ-3КВ+SDAS
ОВГСР			(06.06.2012)					
Сейсмо-инфразвуковая группа	—	VALS	13.06.2016	61.361	30.887	24	Габбродолерит	Регистратор L-card E-24, микрофоны BSWA TECH MA201, усилители BSWA TECH MPA231

очередь надо отметить грозы, а также процессы разрушения льда — образование трещин, торосов, перемещение ледяных полей ветром. Штормы в основном вызывают значительное общее повышение акустического фона, но иногда выделяются отдельные удары больших волн о прибрежные скалы.

Детектор инфразвуковых событий

В течение последних десяти лет детектирование инфразвуковых событий по данным инфразвуковых групп в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН производилось детектором АСД, основанном на методе beamforming — суммировании записей разных каналов со сдвигами, зависящими от предполагаемых азимутов подхода волн и кажущихся скоростей [Асминг и др., 2012]. Детектор был универсален, т.е. подходил для любой конфигурации инфразвуковых датчиков, работал надёжно. Однако за время применения этого детектора было выявлено два существенных недостатка:

- низкая скорость работы,
- большое количество ложных срабатываний.

Для устранения этих недостатков в 2018 г. был разработан новый детектор инфразвуковых сигналов — QACD. В отличие от старого, он ориентирован на поиск инфразвуковых событий в записях групп, состоящих из трёх разнесённых датчиков. Смысл такого ограничения в том, что оно позволяет использовать более быстрые алгоритмы, а трёх датчиков, как правило, хватает для обнаружения большинства инфразвуковых сигналов.

В начале работы, когда детектор считывает из конфигурационного файла координаты датчи-

ков инфразвуковой группы и шаг дискретизации записи, он производит подготовительный расчёт. Для набора возможных обратных азимутов от 0 до 360° с шагом в 1° и углов подхода от 0 до 70° с шагом 10° (всего 2880 вариантов) детектор вычисляет сдвиги сигнала на втором и третьем каналах относительно первого канала в отсчётах:

$$\Delta N_{21} = \text{Int} \left(\frac{\cos \theta \cdot ((x_2 - x_1) \cdot \cos \alpha + (y_2 - y_1) \cdot \sin \alpha)}{v_{\text{звук}} \cdot h} \right), (1)$$

$$\Delta N_{31} = \text{Int} \left(\frac{\cos \theta \cdot ((x_3 - x_1) \cdot \cos \alpha + (y_3 - y_1) \cdot \sin \alpha)}{v_{\text{звук}} \cdot h} \right), (2)$$

где α — обратный азимут, θ — угол подхода к дневной поверхности, h — шаг дискретизации, а $\text{Int}()$ — операция округления до целых.

Если ΔN_{12} и ΔN_{13} для какой-либо пары (α , θ) совпадают с рассчитанными ранее, они игнорируются. Все остальные случаи запоминаются, создаётся набор четвёрок (α , θ , ΔN_{12} , ΔN_{13}). Как правило, число этих четвёрок меньше, чем 2880, потому что существенная часть рассчитанных пар сдвигов совпадает.

Данные просматриваются фрагментами, длину которых задаёт пользователь. Стандартная длина — 10 мин, т.е. 600 с. Вначале производится поиск участков, на которых амплитуда возможного сигнала превышает амплитуду шума. Для этого фрагмент данных разбивается на маленькие (стандартная длина — 3 с) участки, и в каждом считается средняя амплитуда, причём усреднение ведётся по всем отсчётам всех трёх каналов. Таким образом, получается набор амплитуд A_i , $i=1, 200$ (для фрагмента 600 с и окна 3 с).

В этом наборе статистически оценивается уровень шума (выбирается 1/3 часть наименьших амплитуд, по ним считается среднее). Обозначим оценённый таким образом уровень шума N . Вычисляются отношения сигнал/шум для всех участков сигнала $SNR_i = A_i/N$. Далее проверяется, может ли быть сигнал в участках. Считается, что в i -м участке может быть сигнал, если $SNR_{i+k} > SNR_{\text{пороговое}}$, $k = -1, 0, 1$.

Конечно, такой алгоритм поиска предполагаемых сигналов значительно грубее того, который использовался в детекторе АСД – там для каждого значения предполагаемой пары (азимут, скорость) вычислялась сумма каналов с соответствующими сдвигами, и уже в этой сумме искались участки, в которых сигнал превышал шум. В этом случае можно было в принципе засечь более слабые сигналы, однако, как показала практика, по таким слабым сигналам даже опытному человеку-интерпретатору трудно судить, насколько сигнал реален. А вычислительная трудоёмкость нового, простого алгоритма многократно ниже.

Далее, в найденных таким образом участках ищутся когерентные сигналы. Для этого перебираются построенные в начале работы детектора четвёрки. Для каждой четвёрки ($\alpha, \theta, \Delta N_{12}, \Delta N_{13}$) рассчитываются когерентность:

$$C = \frac{1}{3} \cdot (Corr_{12} + Corr_{13} + Corr_{23}), \quad (3)$$

где $Corr_{ij}$ – коэффициент корреляции между участками записи каналов i и j , каждый из которых сдвинут на соответствующий сдвиг ΔN .

Также рассчитывается параметр «Gain» – G , имеющий смысл максимального выигрыша в величине амплитуды при суммировании каналов с данными сдвигами. Для всех пар C и G , которые оказались выше соответствующих порогов, вычисляется рейтинг $R = SNR \times C \times G$, и параметры той четвёрки, на которой R достиг максимума, принимаются за азимут и угол подхода сигнала к дневной поверхности. Таким образом, для каждого маленького (3-секундного) окна определяется, найден ли в нём когерентный сигнал, и запоминаются его азимут и кажущаяся скорость. Однако инфразвуковые сигналы могут быть сколь угодно большой длины, поэтому затем участки с когерентным сигналом могут быть «склеены», т.е. объединены в единый сигнал. Применяется следующее правило. Фрагменты i и j склеиваются, если $|t_i - t_j| < \Delta t_{\text{max}}$ и $|\alpha_i - \alpha_j| < \Delta \alpha_{\text{max}}$.

Параметры Δt_{max} (максимальное расхождение по времени) и $\Delta \alpha_{\text{max}}$ (максимальное расхождение

по азимуту) задаются пользователем в конфигурационном файле. Обычные значения – 10 с и 10° .

Скорость обработки данных Апатитской инфразвуковой группы детектором QADC более чем в 100 раз больше, чем старым детектором ADC, при практически идентичном количестве срабатываний на реальных событиях и существенно меньшем числе ложных срабатываний.

Результаты детектирования событий группой «Валаам»

По данным инфразвуковой группы VALS, было проведено детектирование событий в полосе $1-5$ Гц. В этом диапазоне уровень фона низкий, что обеспечивает высокое соотношение уровня сигнал/шум (SNR) для детектируемых событий. В качестве порога детектирования было установлено условие $SNR > 5$. Из результатов отбрасывались события, для которых скорость звука, вычисленная детектором, существенно превышала скорость звука в воздухе ($V > 0.38$ м/с) – такие значения соответствовали сигналам, источники которых располагались внутри области размещения микрофонов или вблизи границ этой области. Подавляющее число детектированных событий имеет техногенное происхождение – они происходят в будние дни в рабочее время (рис. 2).

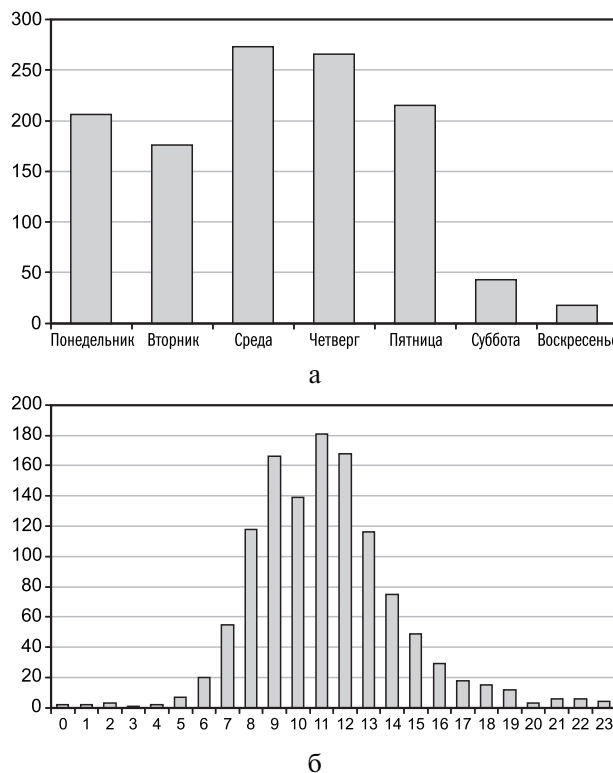


Рис. 2. Распределение детектированных событий за первое полугодие 2018 г.: а – по дням недели; б – по времени суток

Результаты работы детектора были проверены на наблюдениях за период с 13 по 30 июня 2016 года. Была выполнена проверка на предмет пропуска и достоверности событий (удалялись артефакты), количество пропущенных и ошибочных событий оказалось незначительным. Сравнение распределения событий по азимуту на источник до и после проверки показало, что диаграммы качественно похожи (рис. 3), и в дальнейшем ручная обработка не применялась.

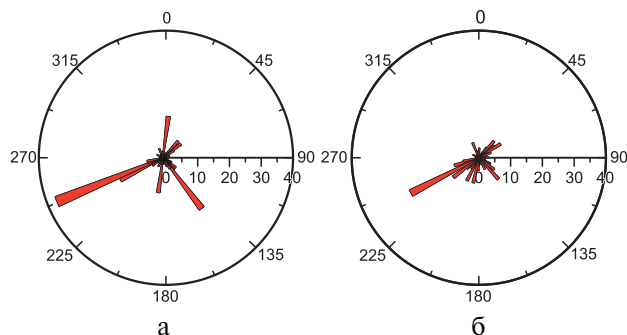


Рис. 3. Азимутальное распределение детектированных событий (здесь и далее шкала по радиусу диаграммы обозначает количество событий).

Сравнение результатов автоматического (а) и ручного (б) детектирования событий по данным инфразвуковой группы VALS в июне 2016 г.

Для оценки азимутального распределения источников сигналы были построены полярные диаграммы, как помесечно, так и ежегодно. На диаграммах выделяется значительный максимум на азимутах 240–250°. С этого направления приходят сигналы от взрывов в гранитных карьерах Карельского перешейка. Также имеется максимум на углах 0–15°, что соответствует гранитным карьерам Северного Приладожья. Была предпринята попытка уменьшить общее число событий, удалив те, для которых по результатам сейсмического мониторинга определены источники (координаты и время в очаге) – в основном это

карьерные взрывы. Для этого из сейсмического каталога Пулковской региональной сейсмической сети за 2016 г. были выбраны очаги, удалённые от инфразвуковой группы на расстояние до 1°, рассчитаны азимуты и времена подхода звуковой волны к инфразвуковой группе. Акустические события, у которых азимут и время регистрации соответствовали расчётным, удалялись из списка. Вопреки ожиданиям, качественно картина распределения источников по азимутам не изменилась (рис. 4).

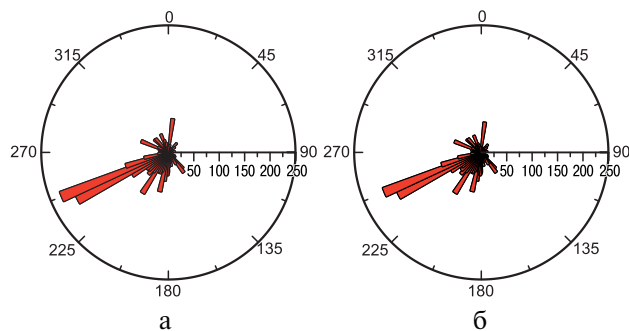


Рис. 4. Азимутальные диаграммы, построенные по данным инфразвуковой группы VALS за июль–декабрь 2016 г., включающие (а) и исключаящие (б) известные карьерные взрывы

Было обнаружено, что инфразвуковой группой зарегистрированы известные взрывы, произведённые на близких карьерах («Кузнечное», удаление – 50–60 км), и значительное число взрывов на далёких карьерах («Каменногорск», «Выборг», удаление – ~100 км). Примеры записей карьерных взрывов приведены на рис. 5.

Распределение направлений на источники акустического сигнала по месяцам часто имеет общие черты, но иногда существенно различается (рис. 6). На фоне такой вариативности ярко выраженной сезонной зависимости обнаружено не было.

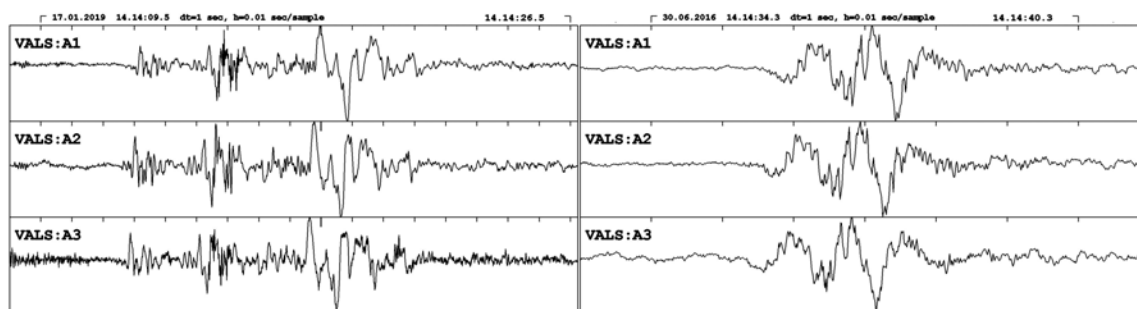


Рис. 5. Примеры записей карьерных взрывов инфразвуковой группой: слева – 17.01.2019 г., «Кузнечное», удаление 60 км; справа – 30.06.2016 г., «Каменногорск», удаление 100 км

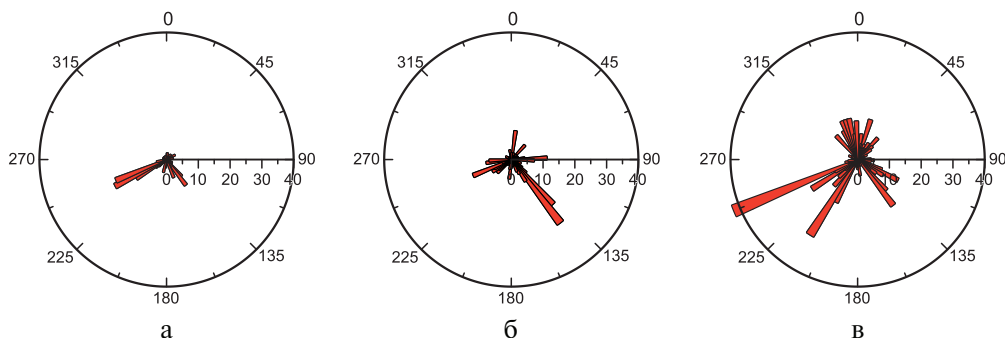


Рис. 6. Азимутальные диаграммы, построенные по данным инфразвуковой группы VALS за июнь (а), июль (б) и август (в) 2018 г.

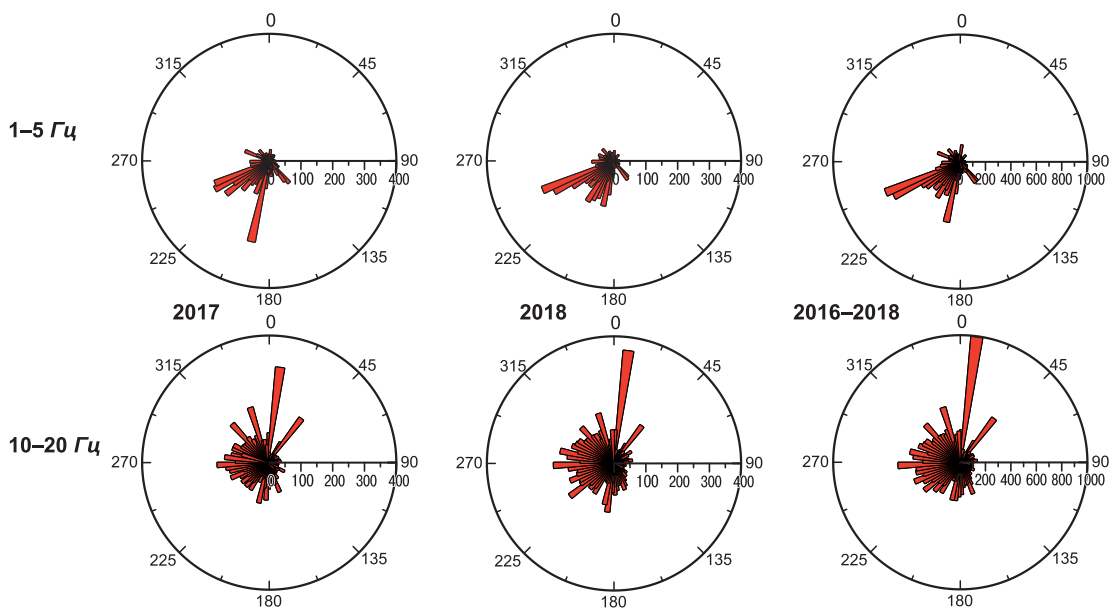


Рис. 7. Суммарные азимутальные диаграммы: слева направо: 2017 г., 2018 г., за весь период наблюдений (июнь 2016 г. – декабрь 2018 г.); верхний ряд – для частотного диапазона 1–5 Гц, нижний – 10–20 Гц

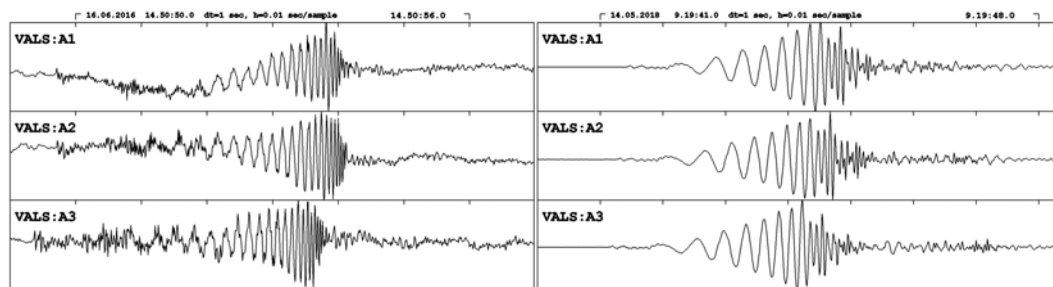


Рис. 8. Примеры сигналов правильной формы неизвестного происхождения: слева – июнь 2016 г.; справа – май 2018 г.

Второй полосой детектирования был выбран диапазон на верхней границе регистрационной возможности инфразвуковой группы: 10–20 Гц ($SNR > 5$). Этот диапазон ближе к порогу слышимости человеческого уха, он характеризуется более высоким уровнем фона, большим количеством детектированных событий. При общем

увеличении числа событий более, чем в 2 раза, было замечено снижения среднего значения SNR примерно в 1.5 раза. В этом диапазоне было детектировано очень мало акустических сигналов от карьерных взрывов, даже самых близких. В то же время существенно возросло количество событий, соответствующих проходящим

в окрестности станции судам — в летние месяцы преобладающим становится азимут $5\text{--}15^\circ$ на причал туристских теплоходов в Большой Никонской бухте.

Несмотря на существенные различия ежегодных диаграмм для разных частотных полос, ежегодные диаграммы азимутов различаются существенно меньше, это справедливо для обоих частотных диапазонов (рис. 7).

Среди сигналов, природа и источники которых не выявлены, часто встречаются сигналы очень правильной формы (рис. 8) — синусоидальные пакеты с увеличивающейся частотой продолжительностью несколько секунд. С большой степенью вероятности можно утверждать, что такой сигнал имеет техногенный источник, тем более, что все подобные события (как минимум 20 за два года) зарегистрированы в рабочее время.

Заключение

На острове Валаам с июня 2016 г. работает трёхкомпонентная инфразвуковая группа VALS. Регистрирующая аппаратура проявила высокую надёжность, работая автономно в сложных погодных условиях.

Разработан новый инфразвуковой детектор, обладающий существенно большим быстродействием при аналогичном качестве выявления событий. Высокая скорость работы детектора позволила провести в короткое время выявление акустических событий за весь период наблюдений группой VALS в двух частотных диапазонах — $1\text{--}5$ и $10\text{--}20$ Гц.

Были построены азимутальные диаграммы направлений на источники: распределение направлений на источники для выбранных частотных диапазонов существенно различается. Сезонные различия в распределении направлений выражены не очень ярко, при этом встречаются существенные отклонения в пределах

одного времени года. Подавляющее большинство детектированных событий, по-видимому, имеет техногенное происхождение, т.к. происходит в будние дни в рабочее время. Небольшая часть выявленных акустических событий также зарегистрирована сейсмической станцией VALR, в основном это карьерные взрывы, удалённые от о. Валаам на $50\text{--}110$ км.

Следует отметить, что в массе зарегистрированных событий пока не удалось обнаружить сигналы, которые могли бы соответствовать бронтитам. В то же время проведённая подготовительная работа позволяет наметить дальнейшие исследования, в ходе которых удастся сузить круг рассматриваемых сигналов за счёт выявления и отбраковки техногенных событий.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01304-20.

Литература

- Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И. Сейсмоинфразвуковой мониторинг на Шпицбергене // Сейсмические приборы. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 20–33.
- Ассиновская Б.А. Сейсмические события на Ладоге в XX в. // Известия РГО. — 2005. — Т. 137. — С. 70–77.
- Ассиновская Б.А., Никонов А.А. Загадочные явления на Ладожском озере // Природа. — 1998. — № 5. — С. 49–53.
- Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Карпинский В.В., Мехрушев Д.Ю. Сейсмические события на Ладоге // Геориск. — 2009. — № 3. — С. 6–12.
- Карпинский В.В. К 10-летию непрерывных сейсмических наблюдений на острове Валаам // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. — С. 155–159.

Сведения об авторах

Карпинский Владимир Вадимович, вед. инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН); вед. инженер Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: karp@plkv.gsras.ru

Асминг Владимир Эрнестович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: asmingve@mail.ru

Results of the infrasonic array on the Valaam Island primary data processing

© 2020 V.V. Karpinsky^{1,2}, V.E. Asming³

¹GS RAS, Saint-Petersburg, Russia; ²SPbSU, Saint-Petersburg, Russia;
³Kola Branch GS RAS, Apatity, Russia

Abstract The infrasound array VALS developed in Kola Branch GS RAS has been installed in June 2016 on the Valaam Island in addition to the continuously operating seismic station VALR. The array consists of 3 spaced low-frequency microphones. The data with sampling rate 100 Hz are stored continuously at the acquisition computer; the timing is carried out using GPS. In addition to the acquisition system, an infrasound signal detector is installed on the computer. It works in near real time mode and enables to find signals and compute their back azimuths. At the end of 2018, a new version of the detector was developed at the Kola Branch GS RAS. The detector began to work much faster, which enabled us to carry out data processing for 2.5 years in two frequency ranges in a short time. The main task of the array is acoustic monitoring, the detection of infrasound events, the determination of their parameters, and the selection of events of natural origin. The data are also used (in combination with the VALR seismic station data) to locate near seismic events, especially weak ones. The analysis of the obtained data revealed the prevailing directions to the signal sources. The change of directions to sources in time was investigated, seasonal features were revealed. Acoustic events were detected in the frequency bands 1-5 Hz and 10-20 Hz, and a significant difference was found in the azimuthal distribution of events for these ranges. A joint analysis of acoustic and seismic data showed that the part of events with both acoustic and seismic components is low - it is almost completely exhausted by career explosions. It was also noted that in addition to explosions in nearby quarries (Kuznechnoye, Pitkäranta) located at a distance of 50-60 km, according to acoustic data, events corresponding to explosions at quarries located at a distance of 100 km or more were repeatedly identified.

Keywords Infrasound, brontide, infrasound detector, Valaam.

For citation Karpinsky, V.V., & Asming, V.E. (2020). [Results of the infrasonic array on the Valaam Island primary data processing]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 85-91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.08>

References

Asming, V.E., Baranov, S.V., Vinogradov, Yu.A., & Voronin, A.I. (2012). [Seismoinfrasound monitoring in Svalbard]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 48(3), 20-33. (In Russ.).

Assinovskaya, B.A. (2005). [Seismic events on Lake Ladoga in the 20th century]. *Izvestiya RGO* [News of the Russian Geographical Society], 137, 70-77. (In Russ.).

Assinovskaya, B.A., & Nikonov, A.A. (1998). [Mysterious phenomena on Lake Ladoga]. *Priroda* [Nature], 5, 49-53. (In Russ.).

Assinovskaya, B.A., Ovsov, M.K., Karpinsky, V.V., & Mekhryushev, D.Yu. (2009). [Seismic events on Lake Ladoga]. *Georisk* [Georisk], 3, 6-12. (In Russ.).

Karpinsky, V.V. (2016). [The decade of continuous seismological observations on Valaam Island]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 155-159). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Information about authors

Karpinsky Vladimir Vadimovich, Leading Engineer of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (GS RAS); Leading Engineer of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State University" (SPbSU), Saint-Petersburg, Russia. E-mail: karp@plkv.gsras.ru

Asming Vladimir Ernestovich, PhD, Leading Researcher of the Kola Branch of GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: asmingve@mail.ru