

УДК 550.34

Исследовательский химический взрыв 18.10.2023 г. в районе Невадского испытательного полигона

© 2023 г. Ю.А. Виноградов, И.Н. Соколова, И.П. Габсатарова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 07.11.2023 г.

Аннотация. Приведены результаты обработки сейсмического события 18.10.2023 г. в районе Невадского испытательного полигона (НИП) по доступным в открытых источниках цифровым записям сейсмических групп и трёхкомпонентных станций на локальных и региональных расстояниях. Получены кинематические и динамические параметры сейсмического события. Проведено сравнение с известными эталонными взрывами и тектоническими землетрясениями на территории НИП с целью оценки мощности, а также определения природы источника. С большой вероятностью исследуемое событие является химическим взрывом с мощностью не менее двух тонн.

Ключевые слова: ДВЗЯИ, Невадский испытательный полигон, химический взрыв, субкритический взрыв, слабые землетрясения, сейсмическая группа.

Для цитирования: Виноградов Ю.А., Соколова И.Н., Габсатарова И.П. Исследовательский химический взрыв 18.10.2023 г. в районе Невадского испытательного полигона // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 7–19. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.01>. – EDN: EFNZCY

Введение

В июне 2023 г. в г. Вене, Австрия, прошла очередная конференция Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) «Наука и технология» (Science and Technology), которая является знаковым научным и политическим событием мирового масштаба. Форум собрал большое количество учёных из разных областей научной деятельности и дипломатов, работающих над проблемами нераспространения ядерных испытаний. Одним из знаковых выступлений на открытии конференции была речь Джилл Хруби [Hruby, 2023], которая в настоящее время занимает пост заместителя министра по ядерной безопасности Министерства энергетики США и руководителя Национальной администрации по ядерной безопасности (NNSA). Доклад Д. Хруби был посвящён научно обоснованной программе управления арсеналами ядерного вооружения, что направлена на исключение инцидентов с ядерным оружием и включает современные диагностические возможности и данные, которые помогут поддерживать безопасность и эффективность ядерных запасов США без проведения дальнейших подземных ядерных взрыв-

ных испытаний. Эта система включает совокупность различных конструктивно-технических и организационных мер, одной из которых является детальное моделирование на высокопроизводительных вычислительных платформах. Физическое понимание процессов, необходимое для разработки и проверки моделирования, основано на данных, собранных в ходе экспериментов на наземных научных объектах, таких как National Ignition Facility в Лоренс Ливерморской Национальной лаборатории или Dual Axis Radiography Hydrodynamic Test Facility в Лос-Аламосской Национальной лаборатории [Hruby, 2023].

Другие важные эксперименты проводятся под землёй на бывшем Невадском испытательном полигоне (НИП), который теперь называется Невадским полигоном национальной безопасности или NNSS. Некоторые из этих экспериментов содержат ядерные материалы, но они являются субкритическими и не приводят к цепной ядерной реакции. Следует отметить, что такие эксперименты не нарушают условий ДВЗЯИ [Hruby, 2023; Договор ..., 1996].

С момента прекращения подземных испытаний ядерных взрывов с 23 сентября 1992 г. по июнь 2023 г. США провели 33 субкритических

эксперимента на территории НИП. Объявлено, что Соединённые Штаты Америки готовят провести два субкритических взрыва в 2024 г. и планируют проводить примерно по три субкритических эксперимента в год к концу десятилетия [Hruby, 2023]. На территории НИП субкритические взрывы, кроме США, проводит Соединённое Королевство [Database ..., 2023]. Следует отметить, что кроме субкритических взрывов на территории НИП проводится большое количество калибровочных и экспериментальных взрывов мощностью до 1 *кт* (здесь и далее показана мощность в ТНТ-эквиваленте (тринитротолуола)), многие из которых хорошо описаны в литературных источниках [Pasyanos, Kim, 2019; The non-proliferation ..., 1994].

Однако сам факт проведения таких экспериментов на территории бывшего ядерного полигона настораживает. Известно, что подземные химические взрывы, произведённые с компактным заложением заряда, имеют схожие волновые формы с подземными ядерными взрывами (ПЯВ), произведёнными в аналогичных условиях [Кедров, 2005; The non-proliferation ..., 1994]. На рис. 1 представлена сейсмограмма химического калибровочного взрыва NPE мощностью примерно 1 *кт*, произведённого на территории НИП в районе Ренье Месса с целью идентификации подземных ядерных испытаний и химических испытаний. Взрыв NPE был произведён под землёй, в тоннеле на глубине 390 м, 22 сентября 1993 г. в 07:00:01.080 UTC с координатами 37.20193°N и 116.20986°W [The non-proliferation ..., 1994]. На этом же рисунке приведена запись ПЯВ "Hunter's Trophy", произведённого 18 сентября 1992 г. ($t_0=17:00:00.078$ UTC, $\varphi=37.20692^\circ\text{N}$, $\lambda=116.20998^\circ\text{W}$) на площадке Ренье Месса в области U12 на глубине $h=385.3$ м с мощностью $Y=1.827$ *кт*, $mb=4.4$ [Database ..., 2023]. Оба взрыва были зарегистрированы сейсмической станцией на расстоянии 40 км. Видно, что оба взрыва имеют схожую волновую картину, и для их распознавания необходимо привлекать дополнительно данные радионуклидного мониторинга.

18 октября 2023 г. пресс-служба американского Министерства энергетики сообщила, что «команда объекта национальной безопасности Невады (Невадский испытательный полигон) провела подземный химический взрыв на объекте с целью улучшения возможности Соединённых Штатов Америки выявлять маломощные ядерные взрывы по всему миру». Для этого эксперимента использовались химические взрывчатые вещества и радиоизотопные индикаторы.

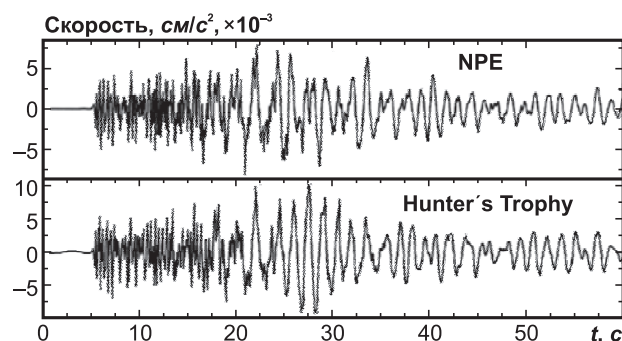


Рис. 1. Сейсмограммы локальной сейсмической станции химического взрыва NPE 22.09.1993 г. и ядерного взрыва "Hunter's Trophy" 18.09.1992 г., $\Delta=40$ км, Z-компоненты [The non-proliferation ..., 1994]

Средства массовой информации широко ретранслировали эту новость. Сам факт такого события не является чем-то экстраординарным, так как на территории полигона химические взрывы производятся довольно часто. Однако это событие имело политический резонанс, так как было представлено как некий «демарш» правительства США в ответ на отзыв Российской Федерацией ратификации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Не вдаваясь в политические аспекты этого события, рассмотрим профессиональный сейсмологический аспект о возможности обнаружения сейсмических событий с $M \leq 2.5$ на территории НИП и распознавания природы таких событий, так как известно, что на полигоне также регистрируются слабые тектонические и техногенные землетрясения, а даже обрушения.

Система наблюдений и используемые материалы

ДВЗЯИ был открыт для подписания 24 сентября 1996 г., в тот же день Российская Федерация подписала Договор, 30 июня 2000 г. он был ратифицирован, а 2 ноября 2023 г. Президент России подписал закон, отзывающий ратификацию Россией ДВЗЯИ.

Для выявления фактов проведения ядерных испытаний международным сообществом стран, подписавших ДВЗЯИ, создается Международная система мониторинга (МСМ), которая представляет собой уникальную современную глобальную сеть станций, включающую четыре взаимодополняющие технологии. После завершения строительства МСМ будет включать 321 станцию мониторинга и 16 лабораторий, расположенных в 89 странах мира, из них: 50 первичных

и 120 вспомогательных сейсмических станций, 11 гидроакустических станций, 60 инфразвуковых станций, 80 радионуклидных станций и 16 радионуклидных лабораторий. В настоящее время 90% из этих объектов уже построены, сертифицированы и успешно работают, обеспечивая постоянный поток данных в режиме, близком к реальному времени.

Российский сегмент МСМ представлен 32 станциями, из них: шесть первичных сейсмических, 13 вспомогательных сейсмических, четыре инфразвуковых, восемь радионуклидных станций и одна радионуклидная лаборатория (рис. 2) [Договор ..., 1996; Кедров, 2005]. Отметим, что ряд станций расположен на региональных расстояниях от ядерных полигонов «Лобнор» (КНР), «Пунгери» (КНДР), «Семипалатинский испытательный полигон» (Республика Казахстан), «Новая Земля» (РФ) (рис. 2). Десять вспомогательных сейсмических станций входят в состав сети ФИЦ ЕГС РАН. Данные всех станций используются в Международном центре данных (МЦД) при составлении сейсмических бюллетеней различной оперативности SEL1, SEL2, SEL3, а также обзорного бюллетеня событий REB. Следует отметить, что большинство из сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН, входящих в состав МСМ, были оборудованы современной цифровой аппаратурой с начала 1990-х гг. Отметим также, что станции OBN и ARU (входящие также в Глобальную сеть IRIS

[Global ..., 2023] с 1988 г.) имеют длительный период аналоговой регистрации, исторические сейсмограммы ПЯВ, зарегистрированные этими станциями, отсканированы с хорошим разрешением и оцифрованы. Благодаря этому создана и постоянно пополняется база данных сканированных и оцифрованных сейсмограмм, которые можно использовать для многих задач сейсмологии (изучение строения литосферы, сейсмическое распознавание ядерных взрывов и землетрясений, калибровка станций, уточнение параметров исторических землетрясений и взрывов, оценка сейсмической опасности и др.).

Станции сейсмической сети ФИЦ ЕГС РАН находятся на значительном удалении от НИП и, несмотря на наличие на территории РФ высокочувствительных групп, эксплуатируемых в основном Министерством обороны РФ, не могут регистрировать на территории США сейсмические события с $M \leq 3.5$. Однако, благодаря активному взаимодействию с Международным центром данных IDC СТВТО, представляющему по специальному «Соглашению между ГС РАН и Подготовительной Комиссией ОДВЗЯИ об использовании данных сейсмических станций в проблеме цунами» волновые формы 50 станций. Они используются для получения оперативных параметров землетрясений в Службе срочных донесений (ССД) ФИЦ ЕГС РАН с ноября 2013 года. К станциям, данные которых поступали в ССД ранее в режиме, близком к реальному

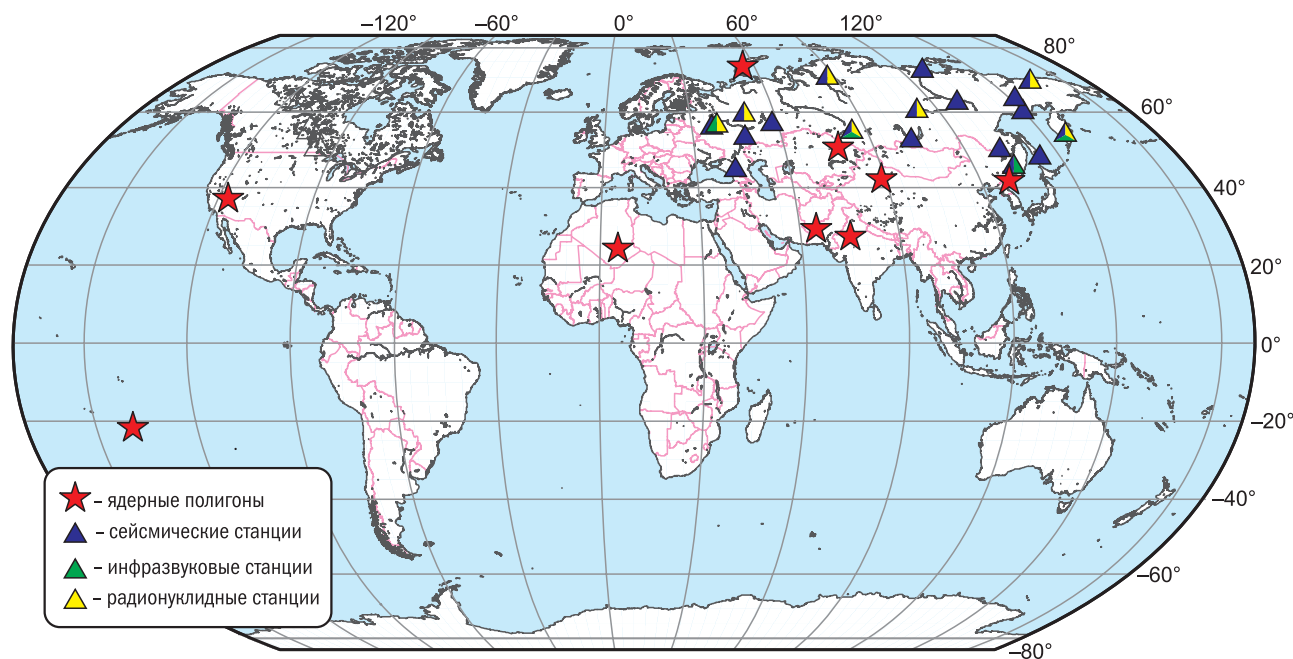


Рис. 2. Карта расположения объектов Российского сегмента Международной системы мониторинга и крупнейших ядерных полигонов мира

времени, с 2014 г. добавились ещё шесть на территории России (KBZ, KIRV, NRIK, PEA0B, USA0B, ZAA0B) и более 20 станций мира.

Для ССД организована подписка на автоматические вступления SLSD (ARRIVAL/SLSD: automatic) девяти станций (AKASG, BRTR, CMAR, FINES, KMBO, MKAR, WRA, YKA, ZALV) и SEL1 (Standard Event List 1) Международного центра данных, создаваемые на основе автоматического программного выделения. Это позволяет дополнить данные национальной сейсмической сети и повысить точность определения основных параметров землетрясений мира [Маловичко и др., 2018]. ФИЦ ЕГС РАН может получать и другие продукты IDC через доступ к защищённому веб-сайту (Secure Web site) IDC: SEL2, SEL3, REB, SSEB (Standard Screened Event Bulletin), SEB. Большое значение имеет предоставленный доступ к цифровым записям сейсмических и инфразвуковых станций IMS-сети организации СТВТО.

Известно, что на территории НИП за период 1951–1992 гг. проведено 904 ядерных испытания США (в т.ч. 100 атмосферных и 804 подземных). Максимальная объявленная мощность составила 1300 кт [United States Nuclear ..., 2000; Database ..., 2023]. Большинство ПЯВ, в том числе самые сильные (мощностью более 100 кт), было произведено в областях Пахуте Меса и Юкка Флэт. Соединённое Королевство произвело на территории НИП 24 ПЯВ. В настоящее время в районе НИП наблюдается слабая сейсмическая активность. После прекращения серии ПЯВ самое сильное землетрясение произошло здесь в 1999 г. ($M=4.5$), за период 2000–2023 гг. на территории полигона не зарегистрировано землетрясений с $M>3.6$.

Рядом с НИП расположены три высокочувствительные сейсмические группы, входящие в первичную сеть МСМ [Договор ..., 1996; Кедров, 2005]: NVAR (Mina Array) [Herrin et al., 2000], TXAR (Lajitas Array) [Certification ..., 2001a] и PDAR (Pinedale Array) [Certification ..., 2001b], удалённые от центра Невадского полигона на 2.22, 7.84 и 12.84° соответственно.

Как было отмечено ранее, 18 октября 2023 г. в 15^h15^m (UTC) на территории Невадского полигона был произведён подземный химический взрыв. Параметры этого события не были представлены в продуктах IDC и бюллетене NEIC Геологической службы США, видимо, по причине его небольшой магнитуды. Сейсмические группы PDAR (Pinedale Array) и TXAR (Lajitas Array) практически не зарегистрировали это событие. Для получения параметров этого события нами были предприняты следующие шаги.

Из открытых ресурсов IRIS DMC выбрана цифровая запись трёхкомпонентной сейсмической станции TPNV («Топопа Спринг») сети US за 18.10.2023 года. Станция укомплектована широкополосным сейсмометром STS-2 и дигитайзером Q330 [United States National ..., 2023]. Станция TPNV установлена прямо на территории НИП и работает с 1992 года. Её данные были использованы для исследования пространственно-временных вариаций структуры поля поглощения S -волн на территории НИП [Kopnichev et al., 2013], для реализации этой задачи были выбраны записи как землетрясений, так и химических взрывов на территории полигона. Опираясь на записи эталонных взрывов из района площадки Ренье Месса в качестве шаблона, была обнаружена запись сейсмического события 18 октября 2023 г. в 15^h15^m с эпицентром в том же районе.

В оперативном режиме были подгружены записи стационарных сейсмических станций, доступные в режиме, близком к реальному времени:

– (SN) – региональной сейсмической сети на юге Невады и прилегающей территории, управляемой Невадской сейсмологической лабораторией Университета Невады, Рино [Southern Great ..., 2023]. Данные этой сети используются для исследовательской и мониторинговой деятельности на объекте национальной безопасности Невады. На станциях сети SN установлены как трёхкомпонентные сейсмические станции (Trillium 120 s + Q330, Trillium 120 s + Reftek130), так и короткопериодные (GEOTECH S13+Reftek130) с частотой оцифровки 100 опросов/с/канал;

– (NN) – региональной сейсмической сети запада Большого Бассейна/Восточной Сьерра-Невады, состоящей из широкополосных, короткопериодических приборов и приборов для измерения сильных движений; сеть используется Сейсмологической лабораторией Невады [Nevada Seismic ..., 2023]. На станциях сети NN установлены трёхкомпонентные сейсмические станции (Trillium 120 s + Q330, Trillium 120 s + Reftek130) с частотой оцифровки 100 опросов/с/канал.

Полученные записи трёхкомпонентных станций были обработаны с выделением сейсмических фаз и последующей локацией гипоцентра (табл. 1, рис. 3). Для локализации применялась программа LocSAT, входящая в программный комплекс GEOTOOL [Coyne et al., 2003]. Математическое обеспечение получено ФИЦ ЕГС РАН из IDC СТВТО и активно используется для исследовательских задач в области сейсмоинфразвукового мониторинга.

Таблица 1. Параметры сейсмического события 18.10.2023 г. по данным ФИЦ ЕГС РАН

t_0 , чч:мм:сс.с	δt_0 , с	Гипоцентр						ML	Сеть		
		φ , °N	$\delta\varphi$, км	λ , °W	$\delta\lambda$, км	h , км	δh , км		Δ_{\min}	Δ_{\max}	GAP/N_{sta}
15:15:00.2	0.56	37.248	4.2	116.139	2.4	1.99	3.7	2.0	0.04	2.37	94/22

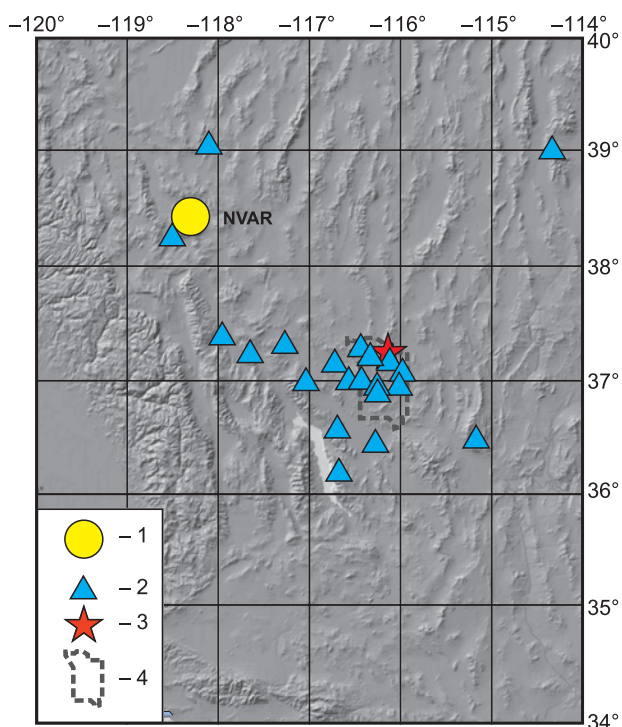


Рис. 3. Карта расположения 3-С станций и ближайшей сейсмической группы первичной сети СТВТО к взрыву 18.10.2023 г. на Невадском испытательном полигоне.

1 – сейсмическая группа NVAR, 2 – трёхкомпонентные станции региональных сейсмических сетей NN и SN, 3 – положение эпицентра взрыва в соответствии с полученными координатами (табл. 1), 4 – границы Невадского испытательного полигона

В табл. 1 представлены результаты локализации сейсмического события 18.10.2023 г. по данным трёхкомпонентных сейсмических станций: $t_0=15^{\text{h}}15^{\text{m}}00.2^{\text{s}}$, $\varphi=37.248^{\circ}\text{N}$, $\lambda=116.139^{\circ}\text{W}$. В локализации участвовали замеры по 21 станции, диапазон эпицентральных расстояний составил 0.04–4.2°, $ML=2.0$.

В оперативном режиме были подгружены записи первичной сейсмической станции MCM NVAR (PS47) [Договор ..., 1996; Кедров, 2005; NVAR Certification ..., 1999; Tibuleac et al., 2001; Tibuleac et al., 2002], доступные в режиме, близком к реальному времени.

Сейсмическая группа (СГ) PS47 (NVAR) была установлена в районе Гарфилд-Хиллз на западе Центральной Невады (Мина, штат Невада) в декабре 1998 г. геофизической лабораторией Южного Методистского университета. В настоящее время СГ NVAR состоит из десяти элементов, оснащённых короткопериодными сейсмометрами GS-13 с дигитайзерами SMART24, апертюра СГ составляет 4 км, частота оцифровки – 40 опросов/с/канал.

Оценки динамических параметров получены по данным трёхкомпонентной сейсмической станции NV33, расположенной рядом со станцией MNV в шахте «Блэк-Бьютт» к северо-западу от Мины, штат Невада, которая оснащена трёхкомпонентным широкополосным сейсмометром с большим периодом (Guralp CMG-3T+ SMART24).

Дополнительно рядом с элементами СГ NV01-04 в феврале 1999 г. была установлена четырёхэлементная инфразвуковая группа.

Исследования чувствительности СГ NVAR показали, что порог обнаружения составляет 90% событий для сейсмических событий из района НИП с $ML<2.0$ [Tibuleac et al., 2001; Tibuleac et al., 2002].

Расположение СГ NVAR вблизи испытательного полигона, длительный срок работы, высокая чувствительность группы, а также комбинирование двух технологий мониторинга позволяют использовать данные СГ для обнаружения, а также для распознавания источников природных и антропогенных сейсмических и акустических сигналов на территории НИП и прилегающих территориях.

На рис. 4 представлены записи взрыва 18.10.2023 г. в 15^h15^m (UTC) на десяти короткопериодных датчиках центральных колец сейсмической группы NVAR. Запись хорошо визуализируется без фильтрации, хорошо выделяются основные региональные фазы P_n , P_g , S_n , L_g . Для всех элементов СГ, кроме NV04, наблюдаются отношения максимальных амплитуд $A_{Lg}/A_{Pg}<1$, записи высокочастотны. Для всех основных региональных фаз был применён ФК-анализ (рис. 5). Приведён результат применения ФК-анализа к записям десяти элементов группы NVAR для P_g -волны. Получен азимут $Az=132^{\circ}$ (соответствует

расчётному значению азимута), медленность – 16 (с/град.) , что соответствует интервалу значений медленности для этой региональной фазы. Аналогичные действия выполнены для других сейсмических фаз.

По данным СГ NVAR создана база данных химических взрывов, в т.ч. эталонных (табл. 2 [Passanos, Kim, 2019]), а также тектонических землетрясений из района полигона (рис. 6).

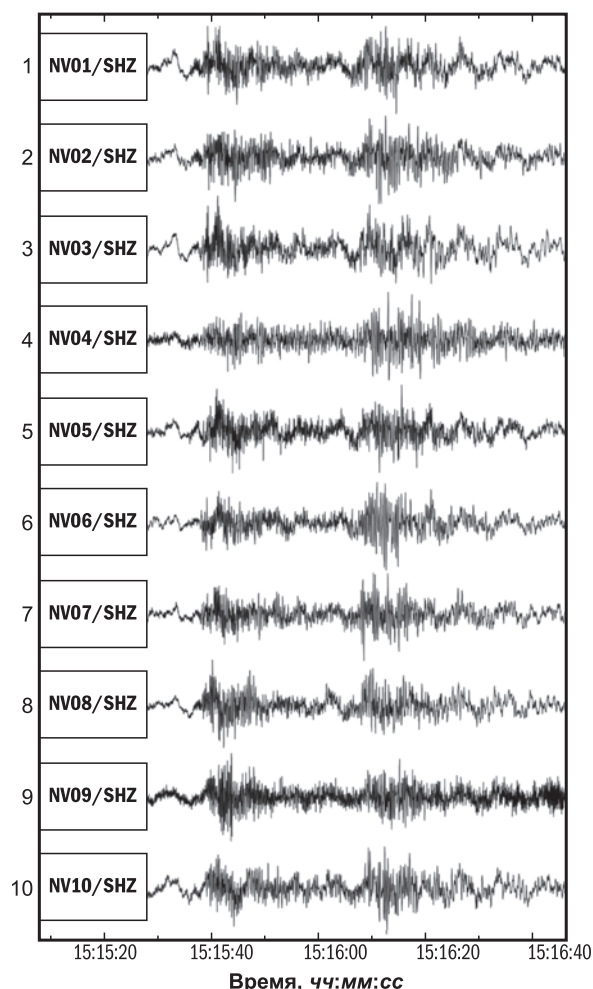


Рис. 4. Записи взрыва 18.10.2023 г. в $15^{\text{h}}15^{\text{m}}$ (UTC) на десяти короткопериодных датчиках центральных колец сейсмической группы NVAR.

Записи не фильтрованы

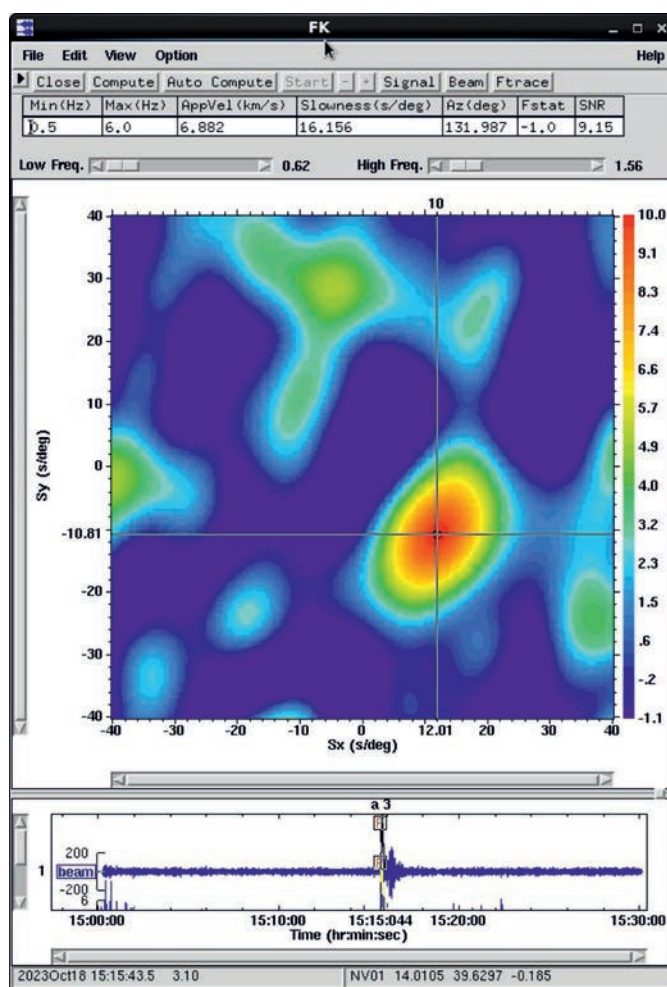


Рис. 5. Результат применения FK-анализа к записям десяти элементов группы NVAR для Pg -волны события 18.10.2023 г. в $15^{\text{h}}15^{\text{m}}$

Таблица 2. Сведения о некоторых химических взрывах на НИП

Название эксперимента	Дата, дд.мм.гггг	t_0 , чч:мм:сс.с	φ , °N	λ , °W	h , м	Мощность, кг ТНТ
SPE1	03.05.2011	22:00:00.01136	37.221207	116.0608674	47.5	87.9
SPE2	25.10.2011	19:00:00.011623	37.221207	116.0608674	45.7	997
SPE3	24.07.2012	18:00:00.44835	37.221207	116.0608674	45.8	905
SPE4	21.05.2015	18:35:44.00000989±230 нс	37.221207	116.0608674	87.2	89
SPE5	26.04.2016	20:49:00.0	37.221207	116.0608674	76.5	5035
SPE6	12.10.2016	18:36:00.000010904±300 нс	37.221207	116.0608674	31.4	2240.2

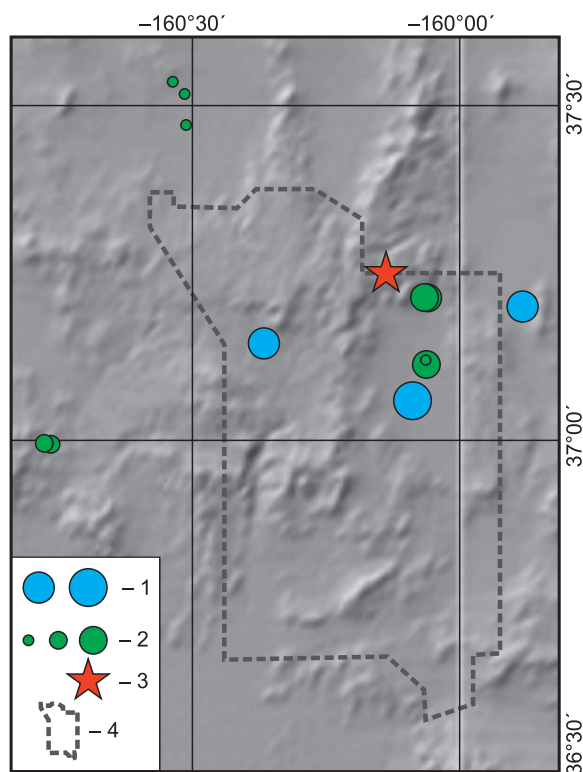


Рис. 6. Карта эпицентров сейсмических событий внутри и вблизи НИП.

1 – тектонические землетрясения, 2 – химические взрывы, 3 – сейсмическое событие, 4 – границы НИП

Сопоставление записей и спектров с эталонными взрывами

В табл. 2 приведены характеристики некоторых эталонных химических взрывов на НИП, среди которых два наиболее значительных, с мощностью ~ 5 и ~ 2 т, – SPE-5 и SPE-6. Сопоставим волновую форму центрального элемента NVAR (NV01) и спектральные мощности этих эталонных событий, а также сейсмического события 18.10.2023 года. Следует отметить, что записи этих событий (фильтрованные в полосе 1–2 Гц) хорошо коррелируют друг с другом ($R=0.90$), однако с довольно низким коэффициентом корреляции ($R \leq 0.3$) – с записью взрыва 18 октября 2023 года. На рис. 7 показаны записи на элементе NV01 калибровочных взрывов SPE-5 и SPE-6 и события 18 октября 2023 года. Амплитудные шкалы SPE-6 и события 18 октября 2023 г. практически совпадают, что может свидетельствовать о сопоставимой мощности этих взрывов (около 2 т). Результат сравнения спектров мощности этих событий (рис. 8) также говорит, что взрывы 12.10.2016 г. и 18.10.2023 г. имеют близкую по значению мощность, и, вероятно,

она близка к 2 т. Однако для более корректной оценки мощности заряда необходимо учитывать также особенности взрывания и характеристики вмещающей среды, которые, как известно, могут значительно повлиять на сейсмический эффект от взрыва [Кедров, 2005]. Следовательно, приведённые выше оценки могут считаться только предварительными.

Как уже отмечалось, не установлено корреляционной близости записей исследуемого события с записями других химических взрывов, проведённых на полигоне НИП и в ближайшем окружении в период работы сейсмической группы NVAR, эпицентры которых показаны на рис. 6.

Задача распознавания природы сейсмических событий хорошо проработана в Международном центре данных (IDC СТВТО) и отчасти заимствована в ФИЦ ЕГС РАН. Она основана на положениях, изложенных в Приложении 2 к Протоколу [Договор ..., 1996], которые включают:

- местоположение явления;
- глубину явления;
- отношение магнитуд поверхностных и объёмных волн;
- частотную составляющую сигналов;
- спектральные отношения фаз;
- спектральные вариации;
- первое движение Р-волны;
- механизм очага;
- относительное возбуждение сейсмических фаз;
- сопоставительные измерения по другим явлениям и группам явлений;
- региональные дискриминанты – там, где это применимо.

В IDC детальный анализ и отбор текущих событий с оценкой их числовым баллом основан на использовании следующих критериев [Кедров, 2005; Бобров, Коён, 2009]: № 1 – соотношение магнитуд объёмной и поверхностной волн ($M_s:m_b$); № 2 – оценка глубины явления (Depth); № 3 – соотношение высокочастотных региональных амплитуд P/S (Reg); № 4 – синергетика сейсмического местоположения и анализ наличия инфразвукового и гидроакустического сигналов (Hydro). Перечисленные критерии применяются при работе с событиями, включёнными после пересмотра результатов автоматической локализации в бюллетень REB (Reviewed Event Bulletin). Событие с данными о возможной его природе, присвоенной категории с числовым баллом, включается в список SSEB (Standard Screened Event Bulletin). Результаты исследования доступны зарегистрированным пользователям,

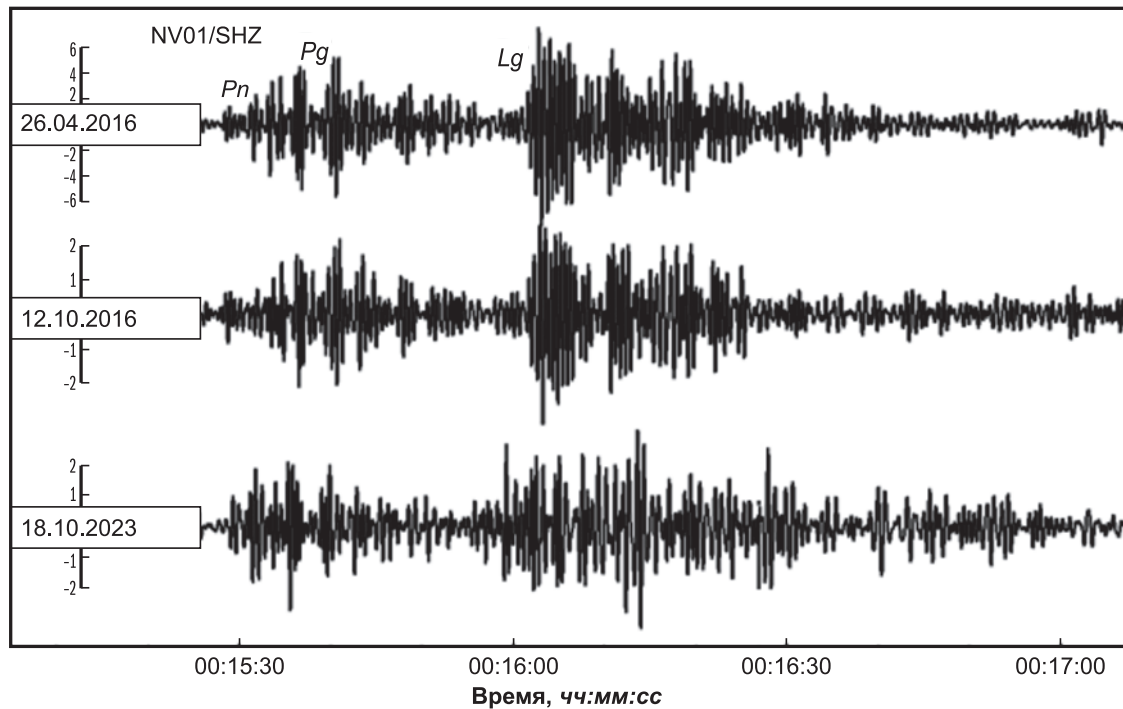


Рис. 7. Сравнение записей на центральном элементе NV01/SHZ сейсмической группы NVAR двух эталонных взрывов 26.04.2016 г. и 12.10.2016 г. и химического взрыва 18.10.2023 г.

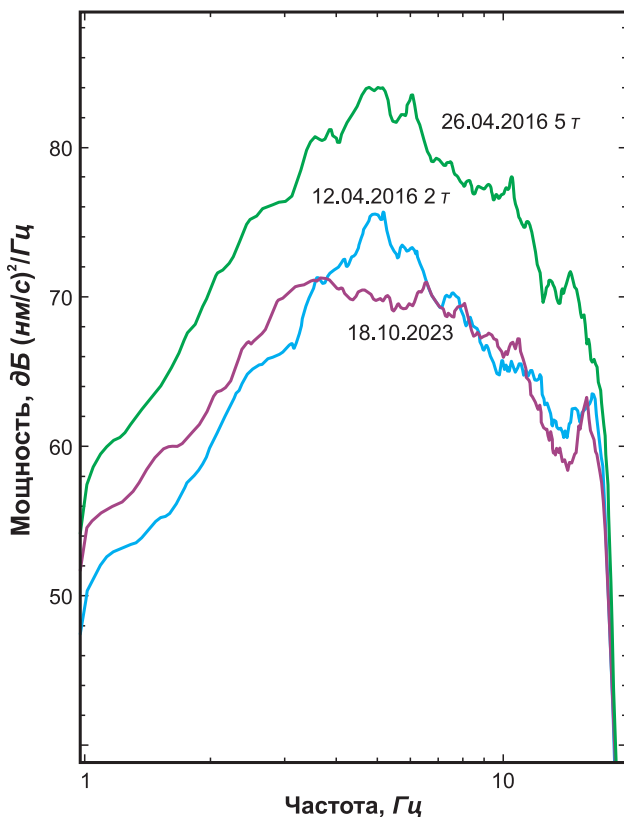


Рис. 8. Сравнение спектров мощности двух эталонных калибровочных взрывов 26.04.2016 г. и 12.10.2016 г. и химического взрыва 18.10.2023 г.

в т.ч. и специалистам ФИЦ ЕГС РАН. Однако, как уже отмечалось, параметры события 18 октября 2023 г. не включены в REB. По запросу получены записи только короткопериодных элементов сейсмической группы NV01–NV10 и одного элемента с широкополосным оборудованием NV31.

Заметим, что критерий № 1 отбора событий по соотношению магнитуды объёмных и поверхностной волн $M_s:mb$ применяется ко всем событиям с $mb \geq 3.5$, представленным в REB, для которых имеется, по крайней мере, два значения M_s . Измерения, проводимые на телесеизмических расстояниях, составляют основу для определения магнитуды объёмных волн. Для событий, которые происходят вблизи станции, изучают два типа объёмных волн – региональные P - и S -волны. Землетрясение обычно создаёт слабые P -волны и сильные S -волны. При взрыве соотношение магнитуд этих волн обычно обратное: P -волны значительно сильнее S -волн [Кедров, 2005; Бобров, Коин, 2009].

Магнитудный дискриминант связан с определённым соотношением mb (магнитуда по объёмной P -волне) и M_s (магнитуда по поверхностной волне) и основан на различной физике процесса при взрывах и землетрясениях. Взрывы возбуждают главным образом P -волны, в отличие от землетрясений, которые сопровождаются

преимущественно поперечными волнами. Поскольку поверхностные волны Релея являются комбинацией волн P и S , то при землетрясениях они оказываются более интенсивными, чем при взрывах [Кедров, 2005; Бобров, Койн, 2009].

На момент написания статьи исследуемое событие не вошло в РЕВ по причине низкой магнитуды. Проверить этот дискриминант не представилось возможным только по записям на короткопериодных приборах NV01–NV10 из тех, которые удалось получить по запросу. Хотя известно, что именно по этой сейсмической группе было проведено тщательное исследование с установкой магнитудных поправок для каждого элемента группы [Tibuleac et al., 2002].

Таким образом, за основу был взят подход спектральной дискриминации.

В. Ким и П. Ричардс [Kim et al., 1993] установили, «что высокочастотное соотношение спектральных амплитуд P/Lg в полосе частот 5–25 Гц является надёжным и устойчивым дискриминантом для классификации слабых событий: химических взрывов и землетрясений».

Визуально на спектрограмме взрыва заметно, что полоса частот в группе P -волн значительно шире в сторону высоких частот, чем в группе Sn , Lg (рис. 9а), в отличие от сейсмограммы землетрясения (рис. 9б), где большая часть энергии реализована в области Sn - и Lg -волн.

На графиках спектров мощности можно видеть, что в полосе 5–20 Гц для взрыва — явное превышение уровней P -волн над уровнем Lg -волн (рис. 10а), на графике спектра мощности землетрясения в широкой полосе частот уровень Lg превышает уровень P -волн (рис. 10б). Следовательно, спектральный дискриминант подчёркивает характерную разницу записей взрыва и землетрясения.

Заключение

Используя доступные данные по сейсмическим станциям и сейсмическим группам Международной системы мониторинга, возможно проводить работы по мониторингу и распознаванию природы слабых сейсмических событий из района Невадского испытательного полигона, начиная с магнитуды 2 и более.

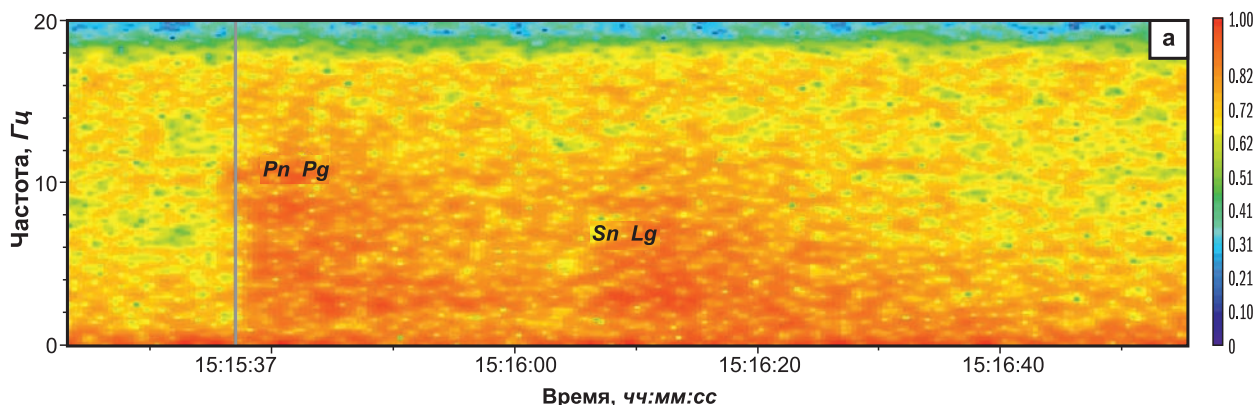


Рис. 9а. Спектрограмма записи центрального элемента NV01/SHZ сейсмического события 18.10.2023 г. в 15^h15^m

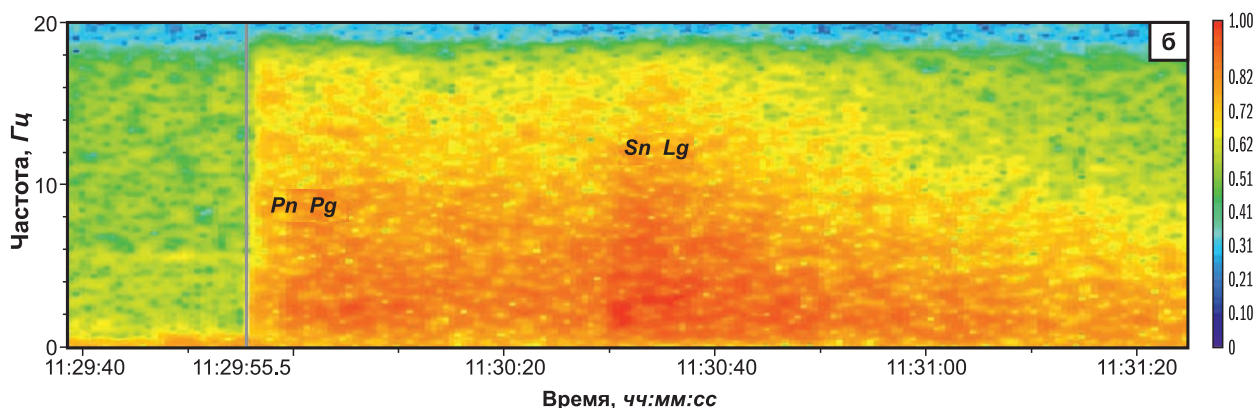


Рис. 9б. Спектрограмма записи центрального элемента NV01/SHZ тектонического землетрясения внутри НИП 25.10.2013 г. в 11^h28^m

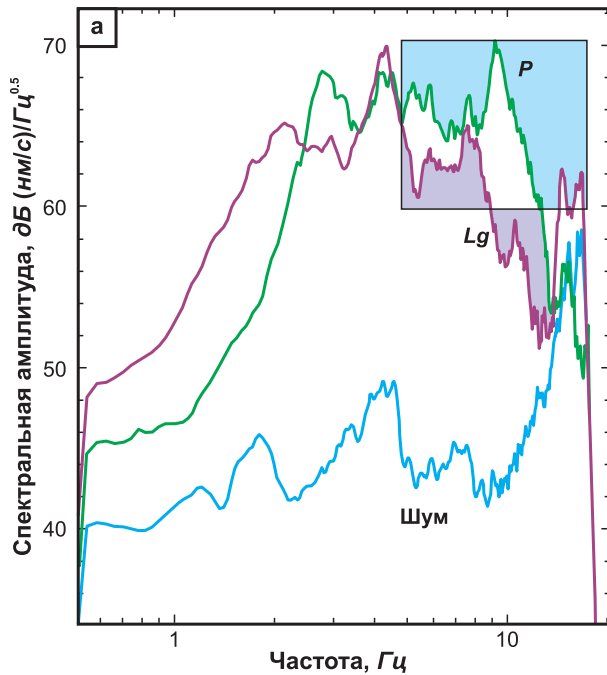


Рис. 10а. Сравнение амплитудных спектров 15-секундных фрагментов записи сейсмических фаз *P*, *Lg* и шума на центральном элементе группы NVAR NV01/SHZ сейсмического события 18.10.2023 г. в 15^h15^m

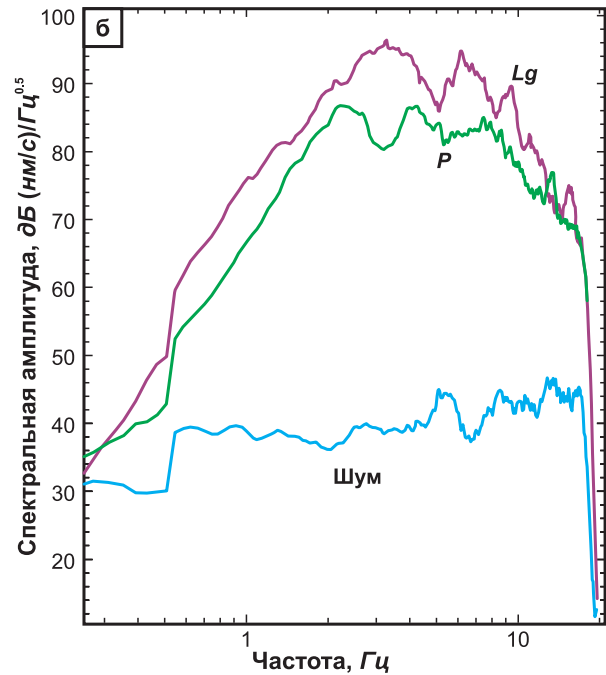


Рис. 10б. Сравнение амплитудных спектров 15-секундных фрагментов записи сейсмических фаз *P*, *Lg* и шума на центральном элементе группы NVAR NV01/SHZ землетрясения 25.10.2013 г. в 11^h28^m

Учитывая многолетнее антропогенное воздействие на среду НИП и изменение её поглощающих свойств, раздробленность геологической среды и наличие полостей, а также возможность проведения камуфлетных взрывов, получение достоверных оценок мощности с использованием только динамических параметров сейсмической записи затруднительно.

Показано, что региональные спектральные дискриминанты не позволяют точно определить природу взрыва для событий небольшой энергии, и для решения этой задачи необходимо дополнительно привлекать данные радионуклидных станций.

Пока верстался номер, на сайте Геологической службы США [M 1.7..., 2023] с большой задержкой была опубликована информация о сейсмическом событии 18 октября 2023 г., ему присвоена категория экспериментального взрыва с параметрами $t_0=15:14:59.434$, широта 37.204°N, долгота 116.186°W, $h=0.0$ км, $ML=1.7$.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23).

Благодарности: Сейсмические данные были загружены через веб-службы IRIS, включая следующие сейсмические сети (<http://ds.iris.edu/>

mda): US (United States National Seismic Network Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)); NN (Nevada Seismic Network, University of Nevada, Reno); SN (Southern Great Basin Network, University of Nevada, Reno); а также через веб-службу СТВТО: данные CG PS47, PS46, PS48.

Литература

- Бобров Д.И., Койн Дж.М. Существующая система отбора событий в Международном центре данных // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – № 3. – С. 11–16.
- Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) / Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей ООН. Пятидесятая сессия 10.09.1996 г. – 153 с.
- Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. – М.; Саранск: ИФЗ РАН, 2005. – 418 с.
- Маловичко А.А., Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Габсатарова И.П., Рыжикова М.И. Использование данных и продуктов Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в сейсмическом мониторинге России в оперативном режиме // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – № 2. – С. 5–10. – DOI: 10.52676/1729-7885-2018-2-5-10
- Certification report primary seismic station PS46 Lajitas, TX, United States of America. – СТВТО, 2001a. – 96 p.

- Certification report primary seismic station PS48 Pinedale, WY, United States of America.* – CTBTO, 20016. – 76 p.
- Coyne J., Clark K., Lloyd S.* IDC Documentations Geotool Software User Tutorial. – 16 July 2003. – 59 p.
- Database of nuclear tests, United States: part 3, 1973–1992 / Wm. R. Johnston (comp.).* – URL: <https://www.johnstonsarchive.net/nuclear/tests/USAn-tests3.html>. (Дата обращения 22.10.2023).
- Global Seismographic Network // SAGE [Site].* – URL: <https://www.iris.edu/hq/programs/gsn> (Дата обращения 23.10.2023).
- Herrin E., Tibuleac I., Golden P., Sorrells G.G.* The Nevada seismic array (NVAR) regional seismo-acoustic studies / Sponsored by Defense Threat Reduction Agency. Contract No. DSW-AOI-97-I-0024. – 2000. – 9 p.
- Hruby J.* High Level Opening - CTBT: Science and Technology Conference 2023. Keynote Address // CTBT: Science and Technology conference series, SnT2023. Speech. – Vienna, June 2023. – URL: <https://conferences.ctbto.org/event/23/>
- Kim W.Y., Simpson D.W., Richards P.G.* Discrimination of earthquakes and explosions in the Eastern United States using regional high-frequency data // *Geophysical Research Letters*. – 1993. – V. 20, N 14. – P. 1507–1510.
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N., Sokolov K.N.* Spatio-temporal variations in the structure of the attenuation field of the *S*-wave in the region of Nevada Nuclear Test Site // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2013. – V. 49, N 6. – P. 786–795. – DOI: 10.1134/S1069351313060086. – EDN: SKZQMD
- M 1.7 Experimental Explosion – Nevada. Earthquake Hazards Program // USGS [Site].* – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us60001-gdw/executive>. (Дата обращения 15.11.2023).
- Nevada Seismic Network [Data set].* University of Nevada, Reno // International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. – DOI: 10.7914/SN/NN. (Дата обращения 22.10.2023).
- NVAR Certification Manual* prepared for the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Provisional Technical Secretariat International Monitoring System Division. – 1999. – 64 p.
- Pasyanos M.E., Kim K.* Seismoacoustic analysis of chemical explosions at the Nevada National Security Site // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – V. 124. – P. 908–924. – DOI: 10.1029/2018JB016705
- Southern Great Basin Network [Data set].* University of Nevada, Reno // International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. – DOI: 10.7914/SN/SN. (Дата обращения 22.10.2023).
- The non-proliferation experiment // Arms Control and Nonproliferation Technologies / Ed. G. Staehle.* – Department of Energy/Office of Nonproliferation and National Security DOE/AN/ACNT-94A, 1994. – 76 p.
- Tibuleac I.M., Bonner J.L., Herrin E.T., Harkrider D.G.* Calibration of the Ms:mb discriminant at NVAR // *Proceedings of the 24th Seismic Research Review – Nuclear Explosion Monitoring: Innovation and Integration.* – 2002. – P. 582–591.
- Tibuleac I.M., Herrin E.T., Negraru P.T.* Calibration studies at NVAR // *Seismological Research Letters*. – 2001. – V. 72, Iss. 6. – 754. – DOI: 10.1785/gssrl.72.6.754
- United States National Seismic Network [Data set].* Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS // International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. – DOI: 10.7914/SN/US. (Дата обращения 22.10.2023).
- United States Nuclear Tests: July 1945 through September 1992 / DOE/NV–209. Rev. 15.* – Las Vegas, NV: Department of Energy, Nevada Operations Office, 2000. – 186 p.

Сведения об авторах

Виноградов Юрий Анатольевич, доктор техн. наук, директор Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: yvin@gsras.ru

Соколова Инна Николаевна, доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: sokolovain@gsras.ru

Габсатарова Ирина Петровна, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: ira@gsras.ru

Chemical explosion of October 18, 2023 at the Nevada Test Site

© 2023 Yu.A. Vinogradov, I.N. Sokolova, I.P. Gabsatarova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received November 7, 2023

Abstract The results of processing the seismic event of October 18, 2023 in the area of the Nevada Test Site (NTS) are presented using digital records of seismic arrays and three-component stations available in open sources, at local and regional distances. Kinematic and dynamic parameters of the seismic event were obtained. A comparison with well-known reference explosions and tectonic earthquakes on the territory of the NTS in order to estimate the event's yield, as well as determination of the source's nature was made. It is highly likely that the event under study is a chemical explosion with yield of at least two tons.

Keywords CTBT, Nevada Test Site, chemical explosion, subcritical explosion, weak earthquakes, seismic array.

For citation Vinogradov, Yu.A., Sokolova, I.N., & Gabsatarova, I.P. (2023). [Chemical explosion of October 18, 2023 at the Nevada Test Site]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(4), 7-19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.01>. EDN: EFNZCY

References

- Bobrov, D., & Coyne, J. (2009). [Current event screening system at the IDC]. *Vestnik NITs RK* [NNC RK Bulletin], 3, 11-16. (In Russ.).
- Certification report primary seismic station PS46 Lajitas, TX, United States of America. (2001a). CTBTO, 96 p.
- Certification report primary seismic station PS48 Pinedale, WY, United States of America. (2001b). CTBTO, 76 p.
- Coyne, J., Clark, K., & Lloyd, S. (2003). *IDC Documentations Geotool Software User Tutorial*. 59 p.
- Herrin, E., Tibuleac, I., Golden, P., & Sorrells, G.G. (2000). *The Nevada seismic array (NVAR) regional seismo-acoustic studies*. Sponsored by Defense Threat Reduction Agency. Contract No. DSW-AOI-97-I-0024, 9 p.
- Hruby, J. (June, 2023). High Level Opening - CTBT: Science and Technology Conference 2023. Key-note Address Speech. *CTBT: Science and Technology conference series, SnT2023*. Vienna, Austria. Retrieved from <https://conferences.ctbto.org/event/23/>
- Johnston, Wm.R. (Comp.). (2023). *Database of nuclear tests, United States: part 3, 1973-1992*. Retrieved from <https://www.johnstonsarchive.net/nuclear/tests/USAntests3.html>
- Kedrov, O.K. (2005). *Seismicheskie metody kontrolya iadernykh ispytaniy* [Seismic methods monitoring of nuclear test]. Moscow, Saransk, Russia: IPE RAS Publ., 418 p. (In Russ.).
- Kim, W.Y., Simpson, D.W., & Richards, P.G. (1993). Discrimination of earthquakes and explosions in the Eastern United States using regional high frequency data. *Geophysical Research Letters*, 20(14), 1507-1510.
- Kopnichev, Y.F., Sokolova, I.N., & Sokolov, K.N. (2013). Spatio-temporal variations in the structure of the attenuation field of the S-wave in the region of Nevada Nuclear Test Site. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(6), 786-795. DOI: [10.1134/S1069351313060086](https://doi.org/10.1134/S1069351313060086). EDN: SKZQMD
- Malovichko, A.A., Starovoit, O.Ye., Kolomiyets, M.V., Gabsatarova, I.P., & Ryzhikova, M.I. (2018). [CTBTO data and data products in seismic monitoring in Russia]. *Vestnik NITs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 5-10. (In Russ.). DOI: [10.52676/1729-7885-2018-2-5-10](https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-2-5-10)
- Nevada Seismic Network [Data set]. University of Nevada, Reno (2023). *International Federation of Digital Seismograph Networks*. DOI: [10.7914/SN/NN](https://doi.org/10.7914/SN/NN)
- NVAR Certification Manual (1999) prepared for the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Provisional Technical Secretariat International Monitoring System Division. 64 p.
- Pasyanos, M.E., & Kim, K. (2019). Seismoacoustic analysis of chemical explosions at the Nevada National Security Site. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 908-924. DOI: [10.1029/2018JB016705](https://doi.org/10.1029/2018JB016705)
- SAGE. Global Seismographic Network. (2023). Retrieved from <https://www.iris.edu/hq/programs/gsn>

- Southern Great Basin Network [Data set]. University of Nevada, Reno. (2023). *International Federation of Digital Seismograph Networks*. DOI: 10.7914/SN/SN
- Stahle, G. (Ed.). (1994). The non-proliferation experiment. In *Arms Control and Nonproliferation Technologies*. Department of Energy/Office of Nonproliferation and National Security DOE/AN/ACNT-94A, 76 p.
- The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) (1996). Resolution adopted by the United Nations General Assembly. Fiftieth session 10.09.1996. 153 p.
- Tibuleac, I.M., Bonner, J.L., Herrin, E.T., & Harkrider, D.G. (2002). Calibration of the Ms:mb discriminant at NVAR. In *Proceedings of the 24th Seismic Research Review – Nuclear Explosion Monitoring: Innovation and Integration*. (pp. 582-591).
- Tibuleac, I.M., Herrin, E.T., & Negraru, P.T. (2001). Calibration studies at NVAR. *Seismological Research Letters*, 72(6), 754. DOI: 10.1785/gssrl.72.6.754
- United States National Seismic Network [Data set]. Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. (2023). *International Federation of Digital Seismograph Networks*. DOI: 10.7914/SN/US
- United States Nuclear Tests: July 1945 through September 1992*. (2000). DOE/NV-209. Rev. 15. – Las Vegas, NV: Department of Energy, Nevada Operations Office, 186 p.
- USGS. M 1.7 Experimental Explosion – Nevada. (2023). *Earthquake Hazards Program*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000lgdw/executive>

Information about authors

Vinogradov Yuri Anatolyevich, Dr., Director of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: yvin@gsras.ru

Sokolova Inna Nikolayevna, Dr., Chief Researcher, Head of the Laboratory of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: sokolovain@gsras.ru

Gabsatarova Irina Petrovna, PhD, Leading Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: ira@gsras.ru