ISSN 1811-0045

Геофизические процессы и биосфера

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

2020

№1

том



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УДК 550.34 PACS 91.30.-f

ИСТОРИЧЕСКАЯ И СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

© 2020 г. Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова*, Н.Н. Полешко

Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан , г. Алма-Ата, Казахстан

* e-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Аннотация. Согласно действующим картам общего сейсмического районирования Республики Казахстан (2006 г.), территория Семипалатинского испытательного полигона (СИП) считается асейсмичным районом. Однако проведенные в последние годы исследования и анализ архивных данных показали, что на территории полигона и вблизи него ранее уже происходили и происходят в настоящее время тектонические и техногенные землетрясения. Максимальная магнитуда зарегистрированных землетрясений составляет 5-5.9. Для решения вопроса наличия сейсмичности в районе СИП проведен анализ мировых сейсмологических бюллетеней и данных по исторической сейсмичности из литературных источников. Начиная с 1925 г. собраны исторические аналоговые сейсмограммы землетрясений, проведено уточнение параметров землетрясений. Обработаны современные инструментальные сейсмические данные сети мониторинга Казахстана с 1994 г., а также временных сетей сейсмических станций, установленных на территории полигона в районе испытательных площадок «Сары-Узень», «Балапан» и «Дегелен» в 2005–2010 гг. В результате создан единый каталог землетрясений для территории СИП и окрестностей с 1783 г. по настоящее время. Для ощутимых землетрясений собраны данные о макросейсмике, проанализированы записи сильных движений. Выделены глубинные разломы, разделяющие блоки земной коры. Уточнение положения тектонических элементов проводилось с использованием дешифрирования космических снимков Landsat, материалов геологической и топографической съемок. Расчеты показывают, что на территории полигона возможны воздействия интенсивностью 6 баллов по шкале MSК-64.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон, сейсмическая опасность, техногенная сейсмичность.

DOI: https://doi.org/10.21455/gpb2020.2-9

Цитирование: Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Полешко Н.Н. Историческая и современная сейсмичность территории Семипалатинского испытательного полигона // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 2. С. 117–134. https://doi.org/10.21455/gpb2020.2-9

ВВЕДЕНИЕ

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) – один из крупнейших в мире полигонов испытаний ядерного оружия. Постановление о необходимости сооружения специального полигона было принято советским правительством 14.11.1946 г. Для этой цели на территории бывш. Казахской ССР была выделена территория площадью 15.5 тыс. км². Первый взрыв советской атомной бомбы мощностью 22 кт был произведен 29.08.1949 г. С тех пор на этой территории произведено 456 ядерных испытаний, среди которых 116 атмосферных и 340 подземных. 29.08.1991 г. указом президента Казахской ССР Н.А. Назарбаева Семипалатинский полигон был закрыт.

С тех пор на полигоне началась новая жизнь. Был открыт Национальный ядерный центр Республики Казахстан, в составе которого действуют несколько научно-исследовательских институтов. В научных целях в настоящее время функционируют три исследовательских реакторных установки, запущен первый в мире специализированный токамак для испытаний материалов будущей термоядерной энергетики. Кроме того, в настоящее время район г. Курчатов, расположенный практически в пределах СИП, рассматривается как одно из возможных мест строительства в Казахстане атомной электростанции. На полигоне существуют скважины и штольни, где ранее проводились ядерные испытания. Вполне вероятно, что в настоящее время в недрах Земли происходят процессы, которые могут сопровождаться сейсмическими явлениями. В связи с этим вопрос изучения сейсмической обстановки и оценка сейсмической опасности района приобретают особую актуальность.

В советское время на региональных сейсмических станциях обработка сейсмических событий из района СИП не проводилась вне зависимости от природы источника зарегистрированного события. Эти события не включались в каталоги землетрясений, например в каталог землетрясений Казахстана. Данные существовавших в то время станций службы спецконтроля СССР были недоступны для их использования при составлении сейсмических бюллетеней в центрах обработки сейсмологических институтов. Но у сейсмологов мира интерес к изучению сейсмических записей событий из района СИП был всегда, что в первую очередь определялось мониторингом ядерных испытаний и сейсмическим распознаванием подземных ядерных взрывов и землетрясений [*Pooley et al.*, 1983].

Безусловно, важнейшим вопросом является вопрос о существовании в этом районе природной сейсмичности, в том числе непосредственно на территории полигона. Были ли здесь землетрясения в исторический период до начала ядерных испытаний на полигоне? Изменилась ли их активность в связи с проведенной серией сильнейших ядерных взрывов?

Другим аспектом проблемы сейсмической опасности является вопрос наличия на СИП наведенной сейсмичности, являющейся следствием проведения здесь многочисленных ядерных испытаний [Соколова и др., 2017]. Существуют ли здесь поствзрывные геодинамические процессы, отражением которых может быть активность слабых землетрясений вблизи мест проведения испытаний?

Поиску ответов на эти вопросы посвящена настоящая работа.

До последнего времени действующей картой общего сейсмического районирования Казахстана является карта, включенная в Строительные нормы и правила Республики Казахстан «Строительство в сейсмических районах» (СНиП РК 2.03-30-2006) (Алматы: ТОО «Изд-во LEM», 2006. 80 с.), составленная коллективом авторов Института сейсмологии Министерства науки – Академии наук Республики Казахстан в 2003 г. (уточнена в 2006 г.). Для ее составления использован комплекс материалов о геодинамических процессах, происходящих в недрах земной коры и верхней мантии: геолого-тектонические, геофизические, сейсмологические данные. В результате их совместного анализа выделены основные сейсмогенерирующие зоны, ответственные за возникновение в них очагов сильных землетрясений, оценен их сейсмопотенциал в единицах магнитуд, рассчитаны области возможных сотрясений разной степени сейсмической интенсивности в баллах шкалы MSK-64. Если посмотреть на эту карту (рис. 1), можно увидеть, что вся территория СИП находится на асейсмичной территории, не являющейся сейсмоопасной. В этом регионе Восточного Казахстана не было выделено сейсмогенерирующих зон, не прогнозировалось возникновение землетрясений с интенсивностью сотрясений более 5 баллов.

В настоящей работе приведены результаты исследований по трем направлениям:

 решение вопроса об исторической природной сейсмичности в районе СИП на основе анализа мировых сейсмологических бюллетеней, существующих каталогов и литературных данных, а также поиска и обработки старых аналоговых сейсмограмм;

2) изучение современной сейсмичности по инструментальным данным станций ИГИ НЯЦ РК с 1994 г.;

 детальное изучение возможной техногенной сейсмичности на территории СИП с помощью полевых наблюдений сетью сейсмических станций непосредственно вблизи мест ранее проведенных ядерных взрывов.



Рис. 1. Карта общего сейсмического районирования Республики Казахстан

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ СИП И ПРИЛЕГАЮЩИХ РАЙОНОВ

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) расположен в северо-восточной части Казахстана. Он находится на стыке трех областей: Карагандинской, Павлодарской и Восточно-Казахстанской. В геологоструктурном отношении территория СИП расположена в центральной части сочленения двух крупных геотектонических структур: каледонского Чингиз-Тарбагатайского (мегантиклинорий) и герцинского Жарма-Саурского (мегасинклинорий) геотектоногенов, структурно относящихся к Алтае-Чингизскому складчатому региону (области), в последнее время чаще называемому ольшой Алтай (рис. 2, *a*).

Изучение геологического строения этих структур ведется еще с XIX в., первые описания приводятся в работах А. Татаринова (1851, 1864 годы), И.В. Мушкетова (1878-1884 гг.) и В.А. Обручева (1905-1909 гг.). Интенсивные исследования начались с 1930-х годов. Основные работы проводились силами экпедиций Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Института геологических наук им. К.И. Сатпаева, Казахстанского института моделирования систем Мингео Республики Казахстан и региональными производственными геологическими объединениями (ПГО или ТГУ) «Центрказгеология» и «Востокказгеология». Начиная с конца 1940-х годов вплоть до 1992 г. изучением геологического строения территории СИП занимались специализированные геологические организации: изыскательская экспедиция № 113 и геологическая партия № 27 ГГЭ 16 района ПГО «Гидроспецгеология». Начиная с 1993 г. работы по изучению геологического строения полигона проводит ИГИ НЯЦ РК.

В результате обобщения и анализа имеющихся материалов, используя дистанционные методы анализа космических снимков и взяв за основу «Схему разрывных структур Большого Алтая», составленную Б.А. Дьячковым [Щерба и др., 1998], построена схема разрывных структур для территории СИП и прилегающих районов (рис. 2, б).

Юго-западная часть площади СИП входит в состав Чингиз-Тарбагатайского геотектоногена, представляющего собой северо-восточную окраинную часть массива каледонид Казахстанского субконтинента, и слагает юго-западный борт герцинской структуры Большого Алтая. Северо-восточная часть СИП занимает югозападную окраину Жарма-Саурского геотектоногена, являющегося краевой (юго-западной) частью Иртыш-Зайсанской складчатой системы, которая сформировалась в герцинскую эпоху складчатости.

Герциниды Жарма-Саура отделяются от каледонид Чингиз-Тарбагатая по Чингиз-Саурскому (другое название – Калба-Чингизский) глубинному разлому, имеющему северо-западное направление и протяженность более 500 км.

Обе структуры северо-западного направления приобрели сложное строение в результате длительного активного тектонического развития. Интенсивная наложенная складчатость разных порядков, глубинный метаморфизм пород, чрезвычайно широкое развитие разрывных нарушений – от глубинных разломов до интенсивной тектонической трещиноватости – их характерные признаки.

На основании геологических и геофизических данных выделяются: 1) проникающие до глубины 200–250 км подкоровые (мантийные) разломы, разграничивающие структуры Большого Алтая и крупные блоки земной коры; они располагаются на расстоянии 30–50 км друг от друга и прослеживаются на сотни километров (Главный Чингизский, Чингиз-Саурский, Чарско-Горностаевский); 2) внутрикоровые разломы, рассекающие слои земной коры в вертикальном и горизонтальном направлениях, что определяет неоднородность геотектоногенов. Они являются главными магмаподводящими каналами (Алейский, Сиректасский, Чинрауский, Знаменский и др.).

По преобладающим направлениям нарушений выделяются две ортогональные системы глубинных разломов: продольно-поперечная (северо-западная и северовосточная) и долготно-широтная. Кроме того, имеются разрывы других направлений (см. рис. 2, δ).

Глубинные разломы ортогональной системы субширотного и субмеридионального направлений – это структуры докаледонского и каледонского заложения, слабо проявленные в верхних структурных ярусах. Расстояние между главными разломами довольно постоянное – 45–55 км. Эта система разрывов выделяется в основном по геофизическим данным и материалам дешифрирования космических снимков. Разрывы достигают поверхности «базальтового» слоя, а в отдельных случаях и поверхности Мохоровичича, являясь структурами подкорового заложения.

В рамках работ по общему сейсмическому районированию территории Казахстана (см., например, [Тимуш и др., 2012]) построены карты сейсмогенерирующих зон. Ближайшие к СИП сейсмогенерирующие зоны – Иртышская, Чингиз-Алакольская и Жарминская - связаны с одноименными региональными разломами (рис. 3). Все зоны имеют сейсмопотенциал по магнитудам $M_{\text{max}} = 5-5.5$, однако не достигают территории СИП, заканчиваясь на юго-востоке от него. Эти зоны, как правило, описаны очень кратко, так как отсутствуют достаточно детальные сейсмологические данные. Это связано с тем, что на протяжении десятилетий в этом регионе инструментальные наблюдения сетью сейсмических станций не проводились, а данные глобальных сетей наблюдений к моменту составления карты были недоступны. По карте ОСР максимальная ожидаемая интенсивность сотрясений на СИП не должна превышать 5 баллов по шкале MSK-64.

Однако следует заметить, что такие крупные разломы, как Главный Чингизский и Жарминский, на самом деле прослеживаются и в пределах территории СИП, пересекая его с юго-востока на северо-запад. Поэтому вполне реально ожидать на этой территории существования очаговых зон землетрясений.







1-6 – сейсмопотенциал (величину см. внутри усл. обозн.); 7 – зоны (цифры в кружках): 1 – Иртышская; 2 – Локтевско-Караиртышская; 3 – Рахмановская; 4 – Нарымская; 5 – Маркакольская; 6 – Сарымсактинская; 7 – Северо-Зайсанская; 8 – Калба-Чингизская; 9 – Жарминская; 10 – Северо-Саурская; 11 – Южно-Саурская; 12 – Тарбагатайская; 13 – Чингиз-Алакольская; 8 – тектонические разломы

СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ, ДАННЫЕ КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ В РАБОТЕ

В XVIII–XIX вв., когда вблизи г. Семипалатинск произошли ощутимые землетрясения, на территории Российской империи сейсмических станций еще не было. Единственным источником информации о землетрясениях были на тот период макросейсмические данные [*Чеканинский*, 1927; Новый..., 1977].

На рис. 4 показано расположение первых сейсмических станций на исследуемой территории: PUL (1906 г.), TIF (1899 г.), TAS (1901 г.), IRK (1901 г.), SVE (1906 г.), AAA (1927 г.), FRU (1927 г.), CHM (1932 г.), SEM (1934 г.). На территории Средней Азии и Казахстана регулярные сейсмические наблюдения были начаты в 1901 г. с открытием в Узбекистане сейсмической станции «Ташкент», в 1913 г. была открыта сейсмическая станция «Самарканд» (Узбекистан), в 1927 г. – сейсмические станции «Алма-Ата» (Казахстан), «Фрунзе» (Киргизия), в 1929 г. – сейсмическая станция «Андижан» (Узбекистан), в 1932 г. – сейсмическая станция «Чимкент» (Казахстан), в 1934 г. – сейсмическая станция «Семипалатинск» (Казахстан), в 1939 г. – сейсмическая станция «Душанбе» (Таджикистан). Эти станции были расположены в городах с достаточно высоким уровнем антропогенных помех,

Рис. 2. Схема размещения геотектоногенов Алтае-Чингизского региона (Большой Алтай) (*a*) и схема разрывных структур района расположения СИП и прилегающих территорий (северо-запад Алтае-Чингизского региона) (*б*)

а. Геотектоногены: *1* – Чингиз-Тарбагатайский; *2* – Жарма-Саурский; *3* – Алтайский. Разрывы: *4* – главные – границы геотектоногенов; *5* – главные.

^{б. 1 – главные глубинные разломы, являющиеся границами геотектоногенов; 2 – главные глубинные разломы северо-западного направления; 3 – главные глубинные разломы северо-восточного направления; 4 – главные глубинные разломы долготно-широтной ортогональной системы; 5 – второстепенные глубинные разломы; 6 – второстепенные разломы; 7 – площадка «Балапан». Цифрами обозначены разломы: 1 – Рубцовский; 2 – Алейский; 3 – Семипалатинск; 4 – Знаменский; 5 – Георгиевский; 6 – Чингиз-Нарымский; 7 – Абралинский; 8 – Чингиз-Балхашский; 9 – Зайсанский; 10 – Центрально-Казахстанский; 11 – Жанаакшиманский; 12 – Сарыозекский; 13 – Кайнарский; 14 – Бурлюганский; 15 – Дегеленский; 16 – Кызыл-Адырский; 17 – Белокаменский; 18 – Каскабулакский; 19 – Акбулакский; 20 – Ново-Таубинский; 21 – Михайловский; 22 – Северо-Михайловский; 23 – Дегелен-Иртышский; 30 – Жолдыбайский; 31 – Жауртагинский; 32 – Главный Чингизский; 33 – Западно-Чингизский; 34 – Восточно-Чингизский; 35 – Аркалыкский; 36 – Чингиз-Саурский (Калба-Чингизский); 37 – Сиректасский; 38 – Чинрауский; 39 – Байгузин-Булакский; 40 – Чарско-Горностаевский; 41 – Западно-Калбинский; 42 – Теректинский; 43 – Калба-Нарымский; 44 – Иртышско-Маркакольский; 45 – Каинлинский}



Рис. 4. Сеть сейсмических станций на территории Казахстана, созданная до 1935 г.



Рис. 5. Расположение сейсмических станций КСЭ ИФЗ АН СССР (1961–1963 гг.)



Рис. 6. Расположение сейсмических станций Алтае-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедиции СО АН СССР (1969–1991 гг.)

в связи с чем на них устанавливалась аппаратура (сейсмометр Никифорова, СКД и др.) с небольшим увеличением. Позже эти станции вошли в состав Единой сети сейсмических наблюдений (ЕССН) СССР. Рядом с исследуемой нами территорией находилась только станция «Семипалатинск». Все остальные сейсмические станции, работавшие в то время, были расположены на большом расстоянии от территории СИП. Учитывая то, что аппаратура была с небольшим увеличением, это позволяло регистрировать только самые сильные землетрясения магнитудой более 4.5. Начиная с 1950-х годов были развернуты сети детальных сейсмических наблюдений в районе Северного Тянь-Шаня для изучения сейсмического режима юга и юго-востока Казахстана и севера Киргизской ССР. На сейсмических станциях Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) АН СССР в основном использовались сейсмометры СКМ-3 с большим увеличением, однако параметры сейсмических событий определялись только для сейсмически активных регионов Тянь-Шаня. Бюллетень событий для территории



Рис. 7. Расположение сейсмических станций сети Института геофизических исследований НЯЦ РК, обработка данных которых производится в Казахстанском национальном центре данных (KNDC)

1 – трехкомпонентная станция; 2 – сейсмическая группа





1 – элементы группы «Курчатов-Крест»; *2* – центральный элемент сейсмической группы «Курчатов-Крест»; *3* – полевые сейсмические станции; *4* – действующие карьеры; *5* – границы испытательных площадок



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И БИОСФЕРА 2020 Т. 19 № 2



Рис. 9. Фрагмент исторической аналоговой сейсмограммы 28.09.1925 г. ($t_0 = 21:42:40$; 50° с.ш.; 77° в.д.; $M_s = 5.8$; сейсмостанция IRK, г. Иркутск) (a), оцифрованные сейсмограммы землетрясения 26.12.1966 г. ($t_0 = 17:39:38.5; 49.52^{\circ}$ с.ш.; 78.71° в.д.; mpv = 4.3, Z-компоненты. По архивным данным КСЭ ИФЗ АН СССР) (δ) и землетрясения 20.03.1976 г. в районе хр. Муржик (50.02° с.ш.; 77.37° в.д.; $M_s = 5.1$, Z-компоненты. Аналоговые записи из архивов ИГИ НЯЦ РК, Института сейсмологии НАН КР, Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) МОН РК) (e), землетрясения 20.07.1988 г. (48.3° с.ш.; 81.1° в.д.; $M_s = 5.1$, Z-компоненты. Аналоговые записи из архива СОМЭ МОН РК) (e), землетрясения 20.01.2015 г. (48.982° с.ш.; 78.759° в.д.; mpv = 5.3, K = 12.2, Z-компоненты. Записи станций сети ИГИ НЯЦ РК) (d)

Северо-Восточного, Северного, Центрального и Западного Казахстана не составлялся.

В 1961 г. ИФЗ АН СССР создал Комплексную сейсмологическую экспедицию (КСЭ) в г. Талгар близ г. Алма-Ата. Основными задачами КСЭ стали изучение строения литосферы, мониторинг ядерных испытаний сейсмическими методами и др. КСЭ было открыто большое количество сейсмических станций на территории всего бывш. Советского Союза, как стационарных, так и временных. Все станции были оснащены чувствительными приборами типа СКМ-3, УСФ, КСЭ и РВЗТ с увеличением *V* от 40 000 до 120 000. В 1961–1963 гг. КСЭ установила станции профиля Памир – Байкал [*Нерсесов, Раутиан*, 1964]. Общая протяженность профиля высокочувствительных сейсмических станций Памир – Байкал составила около 3500 км. Общее количество станций на профиле равнялось 54, средний интервал расстояний между станциями – 70–120 км [*Нерсесов, Раутиан*, 1964] (рис. 5). Профиль пересекал Среднюю Азию, Казахстан, Алтай, Саяны и Прибайкалье. Некоторые станции располагались вблизи СИП, на них было зарегистрировано 19 землетрясений в исследуемом районе с энергетическими классами *K* = 7–9.

После 1969 г. КСЭ передала бо́льшую часть северотяньшаньских станций, расположенных на

территории Казахстана, Институту геологических наук АН КазССР. С 1969 г. КСЭ перестала составлять бюллетени сейсмических событий для Центральной Азии. В связи с этим для исследования сейсмичности СИП за следующий период (1969–1991 гг.) нами привлекались ежегодные сборники «Землетрясения в СССР» [Землетрясения..., 1962–1991], в которых публиковались каталоги по Алтае-Саянскому региону, составленные на основе записи сети станций Алтае-Саянской опытнометодической сейсмологической экспедиции (рис. 6).

С середины 1994 г. в Казахстане заработала новая современная цифровая сейсмическая сеть станций ИГИ НЯЦ РК (рис. 7). До 2002 г. большинство станций работало в постреальном времени, данные собирались и архивировались спустя большой промежуток времени, а совместная рутинная обработка не производилась. За этот промежуток времени авторами были проанализированы данные международных сейсмологических центров; найденные в них события из района СИП были переобработаны, а их параметры уточнены с использованием данных Казахстанской сети мониторинга [Землетрясения..., 1992–2004; Михайлова и др., 2007]. Начиная с середины 2002 г. сейсмический бюллетень для региона Центральной Азии стал создаваться на регулярной основе. В бюллетень Казахстанского национального центра данных (KNDC) ИГИ НЯЦ РК включаются параметры не только тектонических землетрясений, но и параметры событий иной природы, например карьерных взрывов, в связи с чем проводится большая работа по сейсмическому распознаванию природы источников событий [Великанов и др., 2012].

Для детального изучения сейсмичности вблизи мест проведенных ранее ядерных испытаний необходим мониторинг локальной сетью сейсмических станций. В течение 2005-2010 гг. (в 2009 г. исследования не проводились) на территории СИП на время полевого сезона выставлялась сеть полевых станций. На каждом из участков - «Балапан» (2005-2006 гг., 2010 г.), «Дегелен» (2006, 2007, 2010 г.) и «Сары-Узень» (2007, 2008, 2010 г.) – были созданы временные сети, включающие от 1 до 5 полевых станций, укомплектованных сейсмометрами СК-1П и дигитайзерами DAS-6102-16 (PMD/ eentec Scientific, Inc., USA) [Морговская и др., 2006]. Была проведена круглосуточная регистрация сейсмических событий в течение полевых сезонов. На рис. 8 представлена сеть полевых сейсмических станций на территории СИП в 2010 г.

При сейсмическом мониторинге района СИП и прилегающих территорий временной сетью полевых сейсмических станций, устанавливаемых на площадках «Балапан», «Дегелен» и «Сары-Узень», в полевые сезоны 2005–2008 гг. и 2010 г. за 546 сут. непрерывных наблюдений было зарегистрировано 1613 сейсмических событий, из которых бо́льшая часть идентифицирована как карьерные взрывы и только 36 событий отнесены к землетрясениям. Бо́льшая часть землетрясений была зарегистрирована только станциями полевой сети наблюдений и только менее 30 % событий стационарной сетью наблюдений ИГИ НЯЦ РК.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ СИП

Для исследований был выбран район, ограниченный координатами 48°–52° с.ш.; 75°–81.1° в.д. Первым вопросом, который предстояло решить, был вопрос о наличии в районе СИП природной сейсмичности. Для этого привлекались различные источники информации.

1. Проведен анализ сейсмологических бюллетеней международных центров данных (www.isc.ac.uk; www. earthquake.usgs.gov), а также данных по исторической сейсмичности из литературных источников [Чеканиский, 1927; Pooley et al., 1983; Khalturin et al., 2001; Мукамбаев, Михайлова, 2015].

2. Начиная с 1925 г. были собраны исторические аналоговые сейсмограммы землетрясений, проведено уточнение параметров инструментально зарегистрированных землетрясений.

3. Обработаны цифровые сейсмические записи станций региональной стационарной сети Казахстана с 1994 г. [Землетрясения..., 1992–2004; *Михайлова и др.*, 2007; *Морговская и др.*, 2006], когда не составлялись сейсмические бюллетени.

4. За период 2004–2019 гг. собраны данные по сейсмичности района СИП, полученные стационарной сетью станций мониторинга ИГИ НЯЦ РК. Для этого проанализированы сейсмические бюллетени, волновые формы сейсмических событий, проведена работа по сейсмическому распознаванию [Великанов и др., 2012; Мукамбаев, Михайлова, 2015; www.kndc.kz].

5. За период 2005–2010 гг. собраны данные по сейсмичности СИП, полученные полевой сетью наблюдений, установленной непосредственно на площадках «Балапан», «Дегелен», «Сары-Узень» [Морговская и др., 2006; Михайлова и др., 2007].

На рис. 9 представлены сейсмограммы наиболее сильных землетрясений с эпицентрами вблизи СИП, обнаруженные в процессе этой работы. Это землетрясение 1925 г. с магнитудой $M_s = 5.8$ (рис. 9, *a*), землетрясение 1966 г. с mpv = 4.3 (рис. 9, δ), землетрясение 1976 г. с M_s = 5.1 (рис. 9, в), землетрясение 1988 г. с $M_s = 5.1$ (рис. 9, г), землетрясение 2015 г. с mpv = 5.3(рис. 9, д). Аналоговые сейсмограммы оцифровывались для дальнейшего хранения и обработки. Отметим, что землетрясение 28.09.1925 г. произошло задолго до начала ядерных испытаний. Его параметры: $t_0 = 21:42:40(\pm 20)$ с; координаты: $50\pm 1^\circ$ с.ш.; $\lambda = 77 \pm 1^{\circ}$ в.д. Эпицентр располагался в районе Главного Чингизского хребта. Магнитуда составляла *M* ~ 5.8±0.5 (см. рис. 9, а). Такое землетрясение (в зависимости от глубины очага) способно вызвать в эпицентральной зоне колебания интенсивностью 7 и даже 8 баллов в зависимости от глубины очага.

Для более позднего времени также обнаружены записи землетрясений вблизи СИП. По сейсмическим записям станций ИГИ НЯЦ РК 26.03.1996 г. были выделены сигналы от землетрясения магнитудой 4.3. Его эпицентр находился в непосредственной близости от массива Дегелен. Географически эта местность относится к северным склонам хр. Муржик, район глубинного Главного Чингизского разлома. В г. Курчатов землетрясение ощущалось интенсивностью 3 балла.

Это событие вызвало большой интерес среди исследователей, занимающихся проблемами

сейсмомониторинга ядерных взрывов, поскольку его эпицентр находился поблизости от эпицентров проводившихся на полигоне ядерных испытаний. Детальный анализзаписей позволил зарубежным специалистам убедиться, что это событие является землетрясением, обусловленным глубинными тектоническими процессами в земной коре. Ранее именно в этом районе было отмечено аналогичное землетрясение (20.03.1976 г., M = 5.1, см. рис. 9, *в*). Оно также подверглось тщательному анализу зарубежных ученых, направленному на выяснение природы этого события, т.е. на решение вопроса, не является ли это событие ядерным взрывом (см., например, работу [*Pooley et al.*, 1983]).

Одним из последних наиболее сильных землетрясений в этом районе считается землетрясение 20.01.2015 г., произошедшее в 09 ч 30 мин GMT.



Рис. 10. Карта эпицентров землетрясений района СИП и его окрестностей

Размер кружка соответствует магнитуде: *1* − *mb* < 3; *2* − 3 ≤ *mb* < 4; *3* − 4 ≤ *mb* < 5; *4* − *mb* ≥ 5. Тоновые кружки − эпицентры землетрясений до 2004 г.; белые кружки − после 2004 г.



Рис. 11. Гистограммы распределения сейсмических событий в районе СИП по магнитудам за периоды до 2004 г. (*a*) и в 2004–2019 гг. (*б*)



Рис. 12. График повторяемости магнитуд сейсмических событий в районе СИП за период 2004–2019 гг.

Координаты события: 48.982° с.ш.; 78.759° в.д.; *mpv* = 5.3, *K* = 12.2. Все станции сети ИГИ НЯЦ РК записали это землетрясение; самыми близкими к эпицентру землетрясения оказались станции «Курчатов» и «Маканчи» (см. рис. 5, *г*). Очаг землетрясения располагался в районе Главного Чингизского хребта в Чингиз-Алакольской сейсмогенерирующей зоне [*Мукамбаев*, *Михайлова*, 2015]. Землетрясение ощущалось на расстоянии до 300 км от эпицентра. В г. Курчатов оно проявилось интенсивностью 4 балла, в г. Семей – 2–3 балла, в г. Усть-Каменогорск – 2 балла. 02.02.2015 г. в 06 ч 05 мин GMT произошло еще одно землетрясение в данном районе. Оно было слабым по энергии, поэтому его записали только станции «Маканчи» и «Курчатов». По результатам локализации и хорошей корреляции волновых форм этого слабого события и землетрясения 20.01.2015 г. (см. рис. 9, *д*), а также по незначительному временно́му интервалу между двумя толчками это событие определено как афтершок землетрясения 20.01.2015 г.

На рис. 10 представлена сводная карта эпицентров землетрясений территории СИП и его окружения с исторических времен (с 1783 г). до 2019 г. Наиболее сильные землетрясения группируются в две зоны: вблизи г. Семей (бывш. Семипалатинск) и в районе хр. Муржик на западной окраине СИП. Сама территории СИП – сейсмична в своей южной части. Четко прослеживаются эпицентры землетрясений, связанные с Главным Чингизским разломом, представляющим собой сейсмически опасный линеамент. В разные периоды представительная магнитуда регистрируемых землетрясений была различной, что связано с наличием или отсутствием станций регистрации, различной конфигурацией сетей, техническим оснащением сейсмических станций, проводящих мониторинг.

На рис. 11 представлены гистограммы распределения сейсмических событий из района СИП по магнитудам за разные периоды времени. До 2004 г. наибольшее количество зарегистрированных событий имело



Рис. 13. Карта расположения карьеров (квадраты) на территории СИП

магнитуды M = 3-4, за период 2004–2019 гг. большинство событий имело магнитуды 1.5–2.5. На рис. 12 представлен график повторяемости землетрясений на территории СИП за период 2004–2019 гг., представительная магнитуда за этот период составляет mpv = 2.

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

При рутинной обработке сейсмических записей сложной задачей является определение природы источников. Это очень важно для дальнейших работ по оценке сейсмической опасности. Требуется, чтобы

в конечном счете каталог землетрясений был очищен от взрывов и состоял только из природных событий.

После прекращения испытаний на территории СИП началась активная добыча различных полезных ископаемых, которая сопровождается проведением взрывов разной силы и частоты. Аналитики сейсмических данных сталкиваются с проблемой идентификации природы регистрируемых сейсмических сигналов. Часто для их распознавания можно использовать только сейсмические методы, поскольку получить информацию о проведенных взрывах от горнодобывающих предприятий не удается. В процессе работ по изучению



Рис. 14. Сейсмограммы землетрясения 18.04.2004 г. (49.99° с.ш.; 77.42° в.д.; *mb* = 3.8) (*a*) и взрыва на карьере Кара-Жыра 29.06.2008 г. (50.00° с.ш.; 78.63° в.д.; *mb* = 3.3) (*б*)



Рис. 15. Распределение спектральных отношений максимальных амплитуд *S*/*P* взрывов и землетрясений *1* – землетрясения; *2* – взрывы; *3* – разделительный порог. Ост. пояснения см. в тексте

сейсмичности территории полигона был составлен каталог действующих карьеров, собраны эталонные записи взрывов из каждого карьера, необходимые для распознавания природы сейсмических событий, регистрируемых при сейсмическом мониторинге [*Великанов и др.*, 2012]. В настоящее время на территории СИП находится большое количество активных карьеров (рис. 13) – Каражыра (уголь), Найманжал (золото), Есымжал (марганец), Каражал (флюорит), Шорское (молибден), Жанан (золото), Суздаль (золото), Ц. Мукур (золото), Жерек (золото), Дальний и Ближний Новотубинские (известняк для цемента), Абыз (золото, полиметаллы) и др. Для распознавания сейсмических событий по записям сейсмических станций проводится изучение следующего комплекса параметров: 1) координаты эпицентра события и их близость к известным карьерам; 2) глубина события; 3) особенности волновой картины сейсмограмм; 4) время события внутри суток (рабочее или нерабочее); 5) наличие сигнала, зарегистрированного инфразвуковой станцией [Беляшов и др., 2013]; 6) диапазон энергетических классов; 7) спектральное отношение амплитуд в различных волновых группах; 8) характеристики спектров разных волновых групп. В 2010 г. в г. Курчатов (вблизи технической площадки № 2) введена в строй современная инфразвуковая



Рис. 16. Результаты регистрации взрыва на угольном карьере Каражыра (СИП) 14.06.2011 г. инфразвуковой группой «Курчатов»

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И БИОСФЕРА 2020 Т. 19 № 2

группа KURIS с апертурой 1 км, состоящая из четырех пунктов (три – в вершинах равностороннего треугольника, четвертый – в его центре) [Беляшов и др., 2013]. Инсталляция KURIS существенно облегчила процесс распознавания карьерных взрывов.

Каждый из перечисленных параметров в отдельности не может являться признаком для уверенного разделения сейсмических событий на взрывы и землетрясения. Анализ нескольких признаков в комплексе, например близость местоположения эпицентра события к известному карьеру, малая глубина события, характерная запись этого события инфразвуковой станцией, а также время события, относящееся к рабочему времени суток, повышают шанс отнести зарегистрированное сейсмическое событие к классу карьерных взрывов. Наибольшую эффективность при распознавании имеют спектральные отношения поперечных и продольных волн и особенности волновой картины записи события. В качестве дополнительных критериев рассматриваются характерные для каждого карьера диапазоны энергетических классов. Отметим, что конкретные количественные критерии распознавания разные для различных регионов Казахстана, а также для разных станций регистрации, что обусловливает необходимость их детального изучения.

Ниже приведен пример подобного анализа для угольного карьера Каражыра, расположенного на территории площадки «Балапан» СИП. Координаты карьера: 50.018° с.ш.; 78.727° в.д.; он расположен вблизи сейсмической станции «Курчатов» (78 км) и сейсмической группы «Курчатов-Крест» (69 км до центральной точки).

Большинство взрывов, произведенных на карьере Каражыра, имеют массу BB 5–15 т (но есть отдельные взрывы с массой заряда около 50 т), энергетический класс K = 5-7 (единичные – класс K = 9), что соответствует магнитуде mb = 3.8. Такие взрывы записываются большим количеством станций глобальной сети мониторинга и попадают в мировые сейсмологические каталоги. Почти все взрывы производятся в 7–8 ч GMT (в 13–14 ч по местному времени) и 13–14 ч GMT (19–20 ч по местному времени).

На рис. 14 показаны сейсмограммы взрыва, произведенного на карьере Каражыра 29.06.2008 г., и землетрясения 18.04.2004 г., записанных на сейсмической станции «Курчатов». Запись взрыва существенным образом отличается от сейсмограммы землетрясения. У взрыва наблюдается четкое вступление *P*-волны, сравнительно небольшая по амплитуде *S*-волна и доминирующие низкочастотные поверхностные волны, тогда как у землетрясения волновая картина совершенно иная, поверхностные волны отсутствуют, по амплитуде доминирует волна *S*.

Основное внимание при анализе было уделено методу амплитудных отношений *S*- и *P*-волн, как наиболее эффективному и универсальному методу распознавания химических взрывов и землетрясений. Методика обработки включала измерение десятичных логарифмов отношений амплитуд *S*/*P* на вертикальной компоненте при узкополосной фильтрации. Использовались фильтры с центральными частотами 1.25, 2.5, 5 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы на уровне 3 дБ от максимума. На рис. 15 представлен пример такого анализа для карьера Каражыра и близких к нему землетрясений. Четко видно, что по станции «Курчатов» довольно уверенно может быть идентифицирована природа события по спектральному соотношению амплитуд *S*- и *P*-волн.

На рис. 16 представлены результаты регистрации и обработки записи взрыва на угольном карьере Каражыра 14.06.2011 г. инфразвуковой группой KURIS [Беля-шов и др., 2013].

ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

На территории полигона за время его эксплуатации было проведено 340 подземных ядерных взрывов (ПЯВ). Известно, что в течение непродолжительного времени (несколько часов - несколько суток) после ПЯВ регистрировались обрушения полости взрыва [Соколова и др., 2017] (рис. 17). В настоящее время, спустя почти 30 лет после окончания испытаний, в районе инфраструктуры полигона наблюдается геодинамическая активность. Одним из таких проявлений являются сейсмические события малой энергии. В 2010 г. полевой сейсмической станцией DEG1 было зарегистрировано 9 слабых поверхностных событий, форма записей которых похожа на регистрацию обрушения (рис. 18). Магнитуда событий была *mb* < 1. На рис. 19 представлен пример записи землетрясения из района площадки «Дегелен»; эпицентры таких событий согласуются с расположением использованных штолен на полигоне.

В последние годы (2018–2020 гг.) в рамках проекта, поддерживаемого грантом Министерства науки и образования Республики Казахстан, проводится серия полевых работ на трех площадках, где ранее проводились ядерные испытания. Это площадки «Дегелен»,



Рис. 17. Сейсмограмма подземного ядерного взрыва 05.10.1975 г. ($t_0 = 04:27:00.0; 49.78306$ с.ш.; 78.08667 в.д. Площадка «Дегелен»), записанная сейсмостанцией «Курчатов»



Рис. 18. Расположение эпицентров сейсмических событий в районе испытательной площадки «Дегелен» (СИП)

1 – эпицентр события; 2 – сейсмическая станция DEG1;3 – карьер

«Балапан» и «Сары-Узень». Цель этих работ – установить геодинамические проявления сейсмичности в местах проведения испытаний непосредственно около скважин и штолен.

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СИП

Фокальные механизмы определены для семи очагов землетрясений, произошедших с 1976 по 2016 г. (стереограммы приведены на рис. 20). Реализация подвижек в большинстве очагов происходила в условиях близгоризонтального напряжения сжатия в запад-северо-западном направлении, ориентация осей растяжения более вариабельна и по значениям углов погружения, и по азимутам простирания.

Сопоставление параметров плоскостей разрывов в очагах исследуемых землетрясений с тектоникой региона свидетельствует, что структурное объяснение можно найти обеим нодальным плоскостям. Сдвиги с незначительной взбросовой составляющей по крутопадающим на юго-запад плоскостям северо-западного простирания могут отражать сейсмическую активность регионального Главного Чингизского разлома. В то же время более пологие падающие на юго-запад плоскости северо-восточного простирания согласуются с ориентацией разломов, секущих структуры Казахского щита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По комплексу всех полученных данных создан единый каталог землетрясений для территории СИП и его окрестностей с 1783 по 2019 г., выделены наиболее активные сейсмические зоны. С уверенностью можно ответить на вопрос о наличии в этом районе природных тектонических очагов землетрясений. Землетрясения, связанные с активными тектоническими процессами, зарегистрированы на территории СИП и



Рис. 19. Сейсмограммы техногенного землетрясения на площадке «Дегелен» (СИП) 24.07.2010 г. (20:12:55.8 GMT; координаты: 49.698° с.ш.; 78.044° в.д.)



Рис. 20. Стереограммы механизмов очагов землетрясений на территории Семипалатинского испытательного полигона

Показаны главные разломы

в ее окрестностях как в историческом прошлом, так и в последние годы.

2. Действующая карта общего сейсмического районирования Республики Казахстан не отражает фактическую картину существующих сейсмогенерирующих зон и должна быть уточнена для территории СИП.

3. Полученные записи микротолчков вблизи штолен площадки «Дегелен», где ранее проводились ядерные испытания, свидетельствуют о незавершившихся геодинамических процессах в местах проведения ядерных взрывов.

3. Для адекватной оценки количественной сейсмической опасности на исследуемой территории необходимо создать постоянную систему сейсмических наблюдений.

4. Для оценки возможного сейсмического воздействия необходимо провести специальные сейсмические и геолого-тектонические работы по исследованию активности тектонических разломов и установлению их сейсмопотенциала. Очень полезно было бы провести и палеосейсмологические исследования на Главном Чингизском разломе.

5. Предварительные расчеты показывают, что на территории полигона реально возможны сейсмические воздействия с интенсивностью 6–7 баллов по шкале MSK-64.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Беляшов А.В., Донцов В.И., Дубровин В.И., Кунаков В.Г., Смирнов А.А. Новая инфразвуковая группа «Курчатов» // Вестн. НЯЦ РК. 2013. Вып. 2. С. 24–30.
- Великанов А.Е., Султанова Г.С., Аристова И.Л., Соколова И.Н., Мукамбаев А.С. Идентификация промышленных взрывов при оценке сейсмической опасности слабосейсмичных районов Казахстана // Вестн. НЯЦ РК. 2012, Вып. 1. С. 68–73.
- Землетрясения в СССР. М.: Наука, 1962-1991.
- Землетрясения Северной Евразии. Обнинск: ГС РАН, 1992-2004.
- Михайлова Н.Н., Неделков А.И., Соколова И.Н., Полешко Н.Н Исследование сейсмичности территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и его окрестностей // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. Восьмых Геофизических чтений им. В.В. Федынского, г. Москва, ГЕОН, 2–4 марта, 2006 г. Тверь: ГЕРС, 2007. С. 179–190.
- Морговская М.К., Соколова И.Н., Неделков А.И., Султанова Г.С., Казаков Е.Н. Изучение локальной сейсмичности семипалатинского испытательного полигона // Вестн. НЯЦ РК. 2006. Вып. 3. С. 62–69.

- Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Сейсмическая опасность Главного Чингизского разлома для территории Семипалатинского испытательного полигона // Вестн. НЯЦ РК. 2015. Вып. 3. С. 82–86.
- *Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г.* Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра // Экспериментальная сейсмика. М.: Наука, 1964. С. 63–87. (Тр. ИФЗ АН СССР).
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Соколова И.Н., Михайлова Н.Н., Великанов А.Е., Полешко Н.Н. Техногенная сейсмичность на территории Казахстана // Вестн. НЯЦ РК. 2017. Вып. 2. С. 47–57.
- Тимуш А.В., Тарадаева Т.В., Степаненко Н.П., Садыкова А.Б., Сыдыков А. Сейсмогенерирующие зоны

Казахстана. Алматы: ТОО «Хай Технолоджи», 2012. 80 с.

- Чеканинский И.В. Материалы о сейсмических явлениях в Семипалатинской губернии с 1760 по 1927 г. // Зап. Семипалатинского отдела ИРГО. Семипалатинск, 1927. Вып. XVI. С. 14–73.
- Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Стучевский Н.И. и др. Большой Алтай: (геология и металлогения). В 3-х кн. Кн. 1. Геологическое строение. Алматы: Гылым, 1998. 304 с.
- *Khalturin V., Rautian T., Richards P.* A study of small magnitude seismic events during 1961–1989 on and near the Semipalatinsk test site, Kazakhstan // Pure Appl. Geophys. 2001. V. 158. P. 143–171.
- Pooley C.I., Douglas A., Pearce R.G. The seismic disturbance of 1976 March 20, East Kazakhstan: Earthquake or explosions? // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1983. V. 74. P. 621–631.

Сведения об авторах

МИХАЙЛОВА Наталья Николаевна – Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. E-mail: Mikhailova@kndc.kz

СОКОЛОВА Инна Николаевна – Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru **ПОЛЕШКО Наталья Николаевна** – Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. E-mail: poleshko@kndc.kz

HISTORICAL AND CONTEMPORARY SEISMICITY OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE TERRITORY

© 2020 N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova*, N.N. Poleshko

Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan (IGR ME RK), Alma-Ata, Kazakhstan

* e-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Abstract. According to the current maps of general seismic zoning of the Republic of Kazakhstan (2006) the territory of Semipalatinsk Test Site (STS) is considered as aseismic region. Recent investigations and analysis of archived data showed that the Test Site territory and its vicinity have experienced in the past and still experience tectonic and induced earthquakes. Maximum magnitude of recorded earthquakes is 5–5.9. Historic analogue seismograms have been collected beginning from 1925; the earthquake parameters were précised. Contemporary instrumental seismic data of Kazakhstan monitoring network were processed since 1994, as well as data of permanent network of seismic stations installed on the territory of the Test Site in 2005–2010 at the region of testing sites «Sary-Uzen», «Balapan», and «Degelen». The conducted works resulted in creating of a common earthquake catalogue for the STS territory and its vicinity. Macroseismic data was collected for sensible earthquakes; strong motions records were analyzed. Deep faults dividing earth crust blocks were marked out. Tectonic elements were located by decoding of Landsat space images, materials of geologic and topographic surveys. The calculations show that the STS territory can experience events with intensity 6 by MSK-64 scale.

Keywords: Semipalatinsk Test Site, seismic hazard, induced seismicity.

About the authors

MIKHAILOVA Natalya Nikolayevna – Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan (IGR ME RK). Kazakhstan, 050020, Almaty, Chaikinoy, 4. E-mail: mikhailova@kndc.kz

SOKOLOVA Inna Nikolayevna – Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan. Kazakhstan, 050020, Almaty, Chaikinoy, 4. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

POLESHKO Natalya Nikolayevna – Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan. Kazakhstan, 050020, Almaty, Chaikinoy, 4. E-mail: poleshko@kndc.kz

Cite this article as: Mikhailova N.N., Sokolova I.N., Poleshko N.N. Historical and contemporary seismicity of the Semipalatinsk Test Site territory, *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2020, vol. 19, no. 2, pp. 117–134 (in Russian). https://doi.org/10.21455/gpb2020.2-9

English version: *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, iss. 8. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485