

УДК 550.34(476)

МОНИТОРИНГ ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ В БЕЛАРУСИ

Аронов А.Г., Аронов Г.А.

Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Представлены результаты продолжительного сейсмологического мониторинга, проведенного в период с 1983 по 2017 гг. на Старобинском месторождении калийных солей в Беларуси. Рассмотрена сейсмичность, обусловленная подземными выемками горных пород и проявления наведенной сейсмичности, вызываемой активизацией разломов от изменения напряжений в горизонтах, подверженных воздействию природных тектонических сил. Установлено, что пространственно проявление сейсмичности выходит за пределы шахтных полей, охватывая территории, примыкающие к району непосредственных горных работ. Осредненные характеристики повышения сейсмичности слабо зависят от особенностей проводимых выемок горных пород, и, в первую очередь, определяются геометрией разломов в регионе и характером региональных тектонических напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования привели к открытию нового явления в динамике земной коры, получившего название индуцированной сейсмичности. Суть этого явления заключается в том, что антропогенные воздействия могут приводить к образованию дополнительных напряжений внутри Земли и влиять на развитие природных процессов: ускорять накопление напряжений, увеличивая частоту проявления сейсмичности, или способствовать разрядке уже накопившихся напряжений, т. е. являться «спусковым крючком» подготовленного природой сейсмического события. Индуцированная сейсмичность отмечена при разработке месторождений полезных ископаемых, проведении подземных ядерных взрывов, заполнении крупных водохранилищ, строительстве крупных инженерных сооружений [1–3].

В результате техногенного воздействия человека на верхние слои земной коры происходит изменение напряженного состояния среды, что может вызвать разрушение горного массива или подвижки по существующим нарушениям сплошности пород в непосредственной окрестности воздействия. Для районов со слабыми тектоническими напряжениями энергия, высвобождаемая индуцированной сейсмичностью, как правило, невелика – магнитуда (M) событий составляет $M \leq 3,0$. Гипоцентры таких сейсмических событий расположены в пределах промышленного объекта или в определенной близости за его пределами, а сотрясения, вызванные такими событиями, в основном не ощущаются на поверхности. Сейсмические события с такой магнитудой считаются слабыми и серьезной опасности не представляют, но не исключают возможности проявления более сильных событий. Однако существует риск, что сейсмические воздействия могут привести к катастрофическим последствиям, например, к затоплению шахт.

Сочетание инструментально установленного факта местной сейсмичности в районе Старобинского месторождения калийных солей с центром в г. Со-

лигорске в Беларуси и практически полного отсутствия таковой в течение нескольких последних десятилетий на большей части Беларуси свидетельствуют о современной активизации разломов в горно-промышленном районе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Старобинское месторождение калийных солей (Солигорский горнопромышленный район) расположено в северо-западной центрально-клинальной части Припятского прогиба. Солёносные толщи представляют собой переслаивающиеся элементы калиеносной и карбонатно-глинистой породы, также как и слои песчаника и алевролита. Территория месторождения имеет ярко выраженное блоковое строение. Она ограничена с севера субрегиональными Ляховичским и Глусским разломами амплитудой 150–300 м и с юга серией разломов, образующих южную тектоническую зону (рисунок 1). Центральный, Северо-западный и Северный разломы проходят непосредственно через месторождение и делят территорию на восточный, центральный, западный и северо-западный блоки.

Промышленная разработка месторождения была начата в 60-е годы прошлого столетия. В настоящее время на месторождении функционирует пять калийных комбинатов. Добыча калийных солей ведётся шахтным способом с двух горизонтов, залегающих на глубинах с абсолютной отметкой 250 и 450 м.

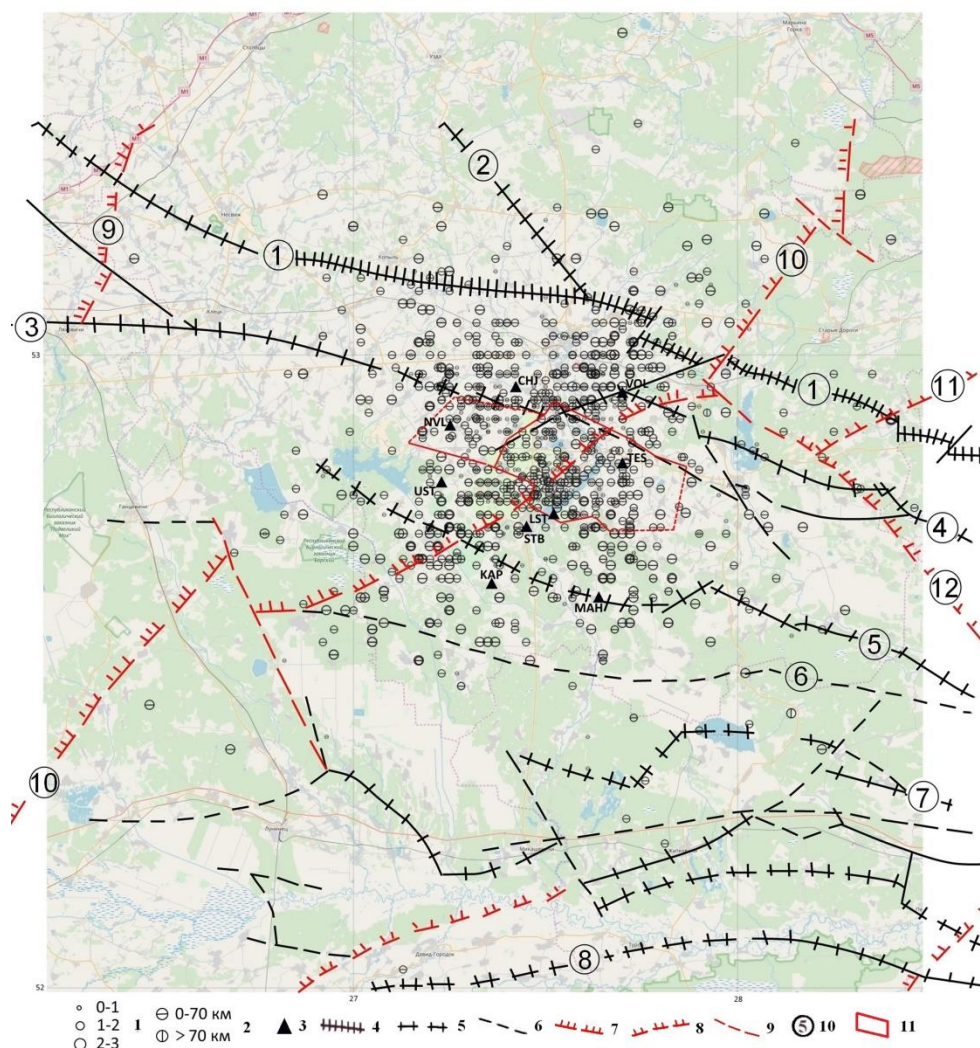
Технологические процессы, связанные с интенсивной добычей калийных солей, складированием в солеотвалах продуктов переработки и обогащения руды, эксплуатацией водохранилища в непосредственной близости от шахтных полей и другими факторами, приводят к нарушению геодинамического равновесия в земных недрах. Крупномасштабное перераспределение горных масс в сочетании с тектонической обстановкой региона стало причиной возникновения местной сейсмичности. Активные геодинамические зоны, контролирующие проявления сейсмических процессов, сформировались под воз-

действием тектонических напряжений. Они представляют собой системы разломов платформенного чехла и консолидированной части земной коры, участки повышенной трещиноватости горных пород и узлы пересечения разнонаправленных разрывных нарушений, испытывающие активизацию на новейшем этапе геологического развития [4–6].

В тектоническом отношении Старобинское месторождение находится в зоне сочленения северо-западной части Припятского прогиба и Белорусской антеклизы и в соответствии с сейсмотектонической картой запада Восточно-Европейской платформы [7, 8] относится к Северо-Припятской сейсмогенной зоне ВОЗ (возникновения очагов землетрясений), в

пределах которой могут возникать землетрясения с максимальной магнитудой $M = 4,0$.

Сейсмические наблюдения в районе месторождения начали проводиться с 1983 г. Более 1500 сейсмических событий было зарегистрировано в регионе за этот период, из которых пять землетрясений имели ощутимый характер: 1978 г. (д. Кулаки, $M = 3,0$), 1983 г. (н.п. Повстынь, $M = 2,8$), 1985 г. (г. Глуск, $M = 3,1$), 1998 г. (п. Погост, $M = 1,9$ и $M = 0,8$). При этом ежегодно фиксируется до 60 сейсмических событий с магнитудой в диапазоне $1 \div 3$. Карта сейсмичности района с тектоническими структурами приведена на рисунке 1.



1 – магнитуда землетрясения; 2 – глубина в км; 3 – сейсмическая станция; (4–6) – разломы, проникающие в чехол: 4 – суперрегиональный, ограничивающий крупнейшие надпорядковые структуры; 5 – региональный, ограничивающий крупные I, II порядка структуры; 6 – локальный; (7–9) – разломы, не проникающие в чехол: 7 – суперрегиональный, разграничивающий крупнейшие области разного возраста переработки; 8 – региональный, разграничивающий крупные области разного возраста переработки; 9 – локальный; 10 – разлом (цифра в кружке): 1 – Северо-Припятский, 2 – Налибокский, 3 – Ляховичский, 4 – Речицкий, 5 – Червонослободско-Малодушинский, 6 – Копаткевичский, 7 – Шестовичский, 8 – Сколодинский, 9 – Выжевско-Минский, 10 – Стоходско-Могилевский, 11 – Кричевский, 12 – Чечерский; 11 – граница шахтных полей Солигорского горнопромышленного района

Рисунок 1. Карта эпицентров землетрясений в районе Солигорского горнопромышленного района

Расположение эпицентров зарегистрированных землетрясений (рисунок 1) показывает, что многие разломы сейсмически активны. Эпицентры большинства слабых сейсмических толчков сконцентрированы вдоль разломов различного направления или их звеньев, т. е. слабые землетрясения в общих чертах трассируют разлом. Наблюдается приуроченность землетрясений к следующим разломам: субмеридионального простирания – Бешенковичскому и Кореличскому; северо-восточного простирания – Стоходско-Могилёвскому, Кричевскому, Выжевско-Минскому и субширотного простирания – Полоцкому, Северо-Припятскому, Ляховичскому, Речицкому, Червонослободско-Малодушенскому, Копаткевичскому, Шестовичскому, Сколодинскому. Отдельные события приурочены к зонам пересечения этих разломов [4–6]. Анализ приведенных сейсмологических данных позволяет сделать вывод о тенденции к возникновению землетрясений вне шахтного поля и о приуроченности их эпицентров к существующим в регионе разломам.

Распределение землетрясений по глубине за период с ноября 2011 г. по декабрь 2017 г. показано на рисунке 2. В основном очаги землетрясений (229) располагались на глубине 0–30 км, остальные (75) в интервале глубин 31–70 км.

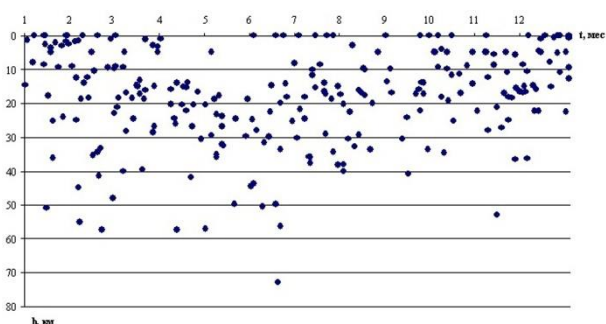


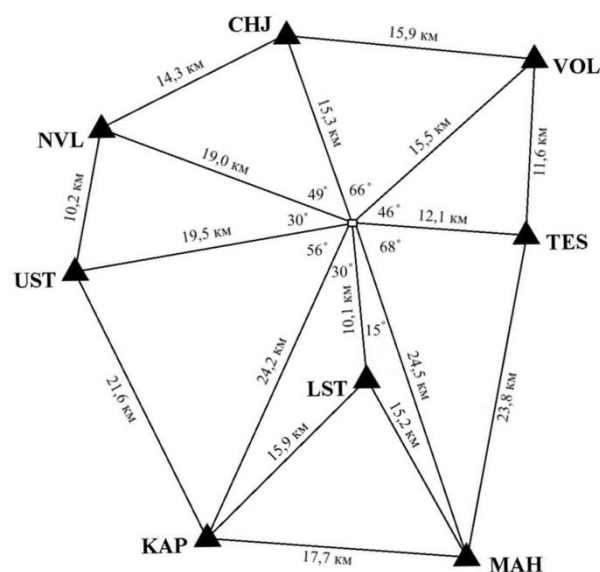
Рисунок 2. Распределение числа землетрясений по глубине очага за 2011–2017 гг.

Современные сейсмологические наблюдения в Солигорском горнопромышленном районе представляют собой локальную сеть, организованную в конце 2011 г. в составе 8 пунктов наблюдений. Структура этой локальной сети была определена с учетом геолого-геофизических и сейсмотектонических условий района как относительно ближайших зон ВОЗ, так и от сильных землетрясений, в том числе из глубокофокусной зоны в горах Вранча в Восточных Карпатах.

На рисунке 3 показана конфигурация локальной сети: среднее расстояние от центра шахтного поля до сейсмических станций 17,5 км; среднее расстояние между сейсмическими станциями по периметру 16,4 км; средний угол «станция–центр шахтного поля–станция» 45 градусов.

Сейсмические станции локальной сети оборудованы однотипной аппаратурой наблюдений, состоя-

щей из короткопериодного 3-компонентного сейсмометра LE-3Dlite (Lennartz Electronic, Германия), 24-разрядного регистратора сейсмических сигналов Дельта-03 (ООО «Логис», Россия), промышленного компьютера с процессором Intel Atom eBOX-530-820-FL1 и вспомогательного оборудования. Управление сейсмической станцией в пункте наблюдений осуществляется регистратором и промышленным компьютером, связанными между собой с использованием сетевой технологии. Это обеспечивает надежную передачу зарегистрированных данных по интернет-каналу связи в основной сервер центра сбора и обработки данных (ЦСОД) локальной сети с гарантированной защитой от потери информации при возникновении неполадок и внештатных ситуаций (рисунок 4).



▲ – сейсмические станции: Волоты (VOL), Тесово (TES), Устронь (UST), Чижевка (CHJ), Копаткевичи (KAP), Новый луг (NVL), Махновичи (MAN), Листопадовичи (LST)

Рисунок 3. Конфигурация Солигорской сети сейсмических станций в районе Старобинского месторождения калийных солей

Система обработки сейсмических данных основана на программном комплексе WSG [9] с дополнительным пакетом компьютерных программ, разработанных в Центре геофизического мониторинга НАН Беларуси. При этом обеспечивается выполнение следующих функций: сбор информации в режиме реального времени, запись и контроль качества данных; управление обработкой; проведение сейсмологических расчетов; хранение волновых форм и обработанных данных; организация связи между процессами. Графический интерфейс пользователя предоставляет возможность выделения фаз как автоматически (расстановка фаз) так и вручную, визуализацию события, его картографическое отображение, системного мониторинга (сервисное наблюдение за работой системы).

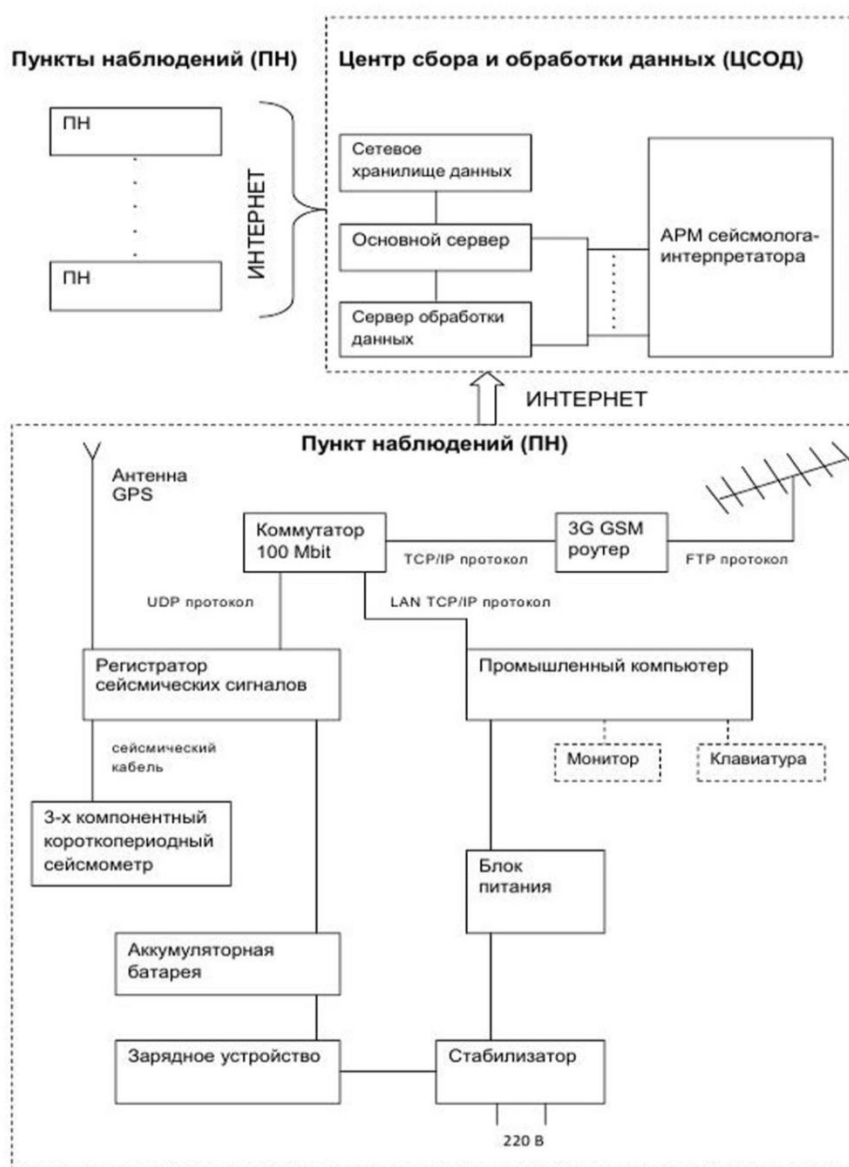


Рисунок 4. Структура Солигорской локальной сети

Эффективным инструментом для экспресс-анализа обнаружения полезного сигнала является «прослушивание» зарегистрированной сейсмической записи. Методика заключается в том, что диапазон сейсмических частот транспонируется в акустическую область, что обеспечивает реальную возможность их прослушивания. При этом тембровая окраска волновой картины слабых полезных сейсмических сигналов значительно отличается от волновой картины сейсмических шумов. Сочетая визуальный просмотр зарегистрированных сейсмических сигналов (включая спектральный портрет) с акустическим, можно значительно повысить эффективность обнаружения слабых сигналов на фоне интенсивных шумов. Прослушивая данные, можно по звуку отнести зарегистрированную запись к определенному типу сейсмического события или помехи.

В практике обработки выделены звуковые «портреты» как записей помех, так и сейсмических событий. Кроме того, сейсмические события отличаются по звучанию в зависимости удаленности от станции, а так же от специфических условий расположения самой станции. В ряде случаев бывает достаточно трудно по звуку отличить взрыв от местного землетрясения и при обработке используются специальные критерии дискриминации, основанные на спектрально-временных зависимостях с их последующей параметризацией. После выделения таким образом участков с записями полезных сигналов проводится их дальнейшая визуальная обработка.

Информационно-аналитическое обеспечение локальной сети поддерживается системой реляционных баз данных, позволяющих структурировать и связывать все типы сейсмических данных с

возможностью составления сложных запросов и получения максимально содержательных отчетов. При этом обеспечена надежная сохранность полученной информации, как для оперативного доступа, так и для долговременного архивного хранения.

Анализ данных сейсмологического мониторинга, объективная и оперативная картина сейсмической обстановки осуществляется с применением геоинформационной системы ArcGIS как в виде отдельных (в т.ч. специально разработанных) программ, так и в виде встроенных графических интерфейсов пользователей. Обработанные данные систематизируются по следующим позициям: цифровые записи сейсмических событий; бюллетени сейсмических станций; сводный бюллетень; каталоги сейсмических событий; карты эпицентров; графики параметров сейсмичности и обзоры данных.

Солигорская локальная сеть сейсмологического мониторинга интегрирована в региональную систему наблюдений. Такая интеграция существенно расширяет возможности и повышает эффективность национальной сети, позволяет производить оперативный обмен данными, повышает точность определения параметров землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibowicz, S.J. Seismicity induced by mining: recent research / S.J. Gibowicz // *Advances in geophysics*. 2009. – Vol. 51. – P. 1–53.
2. Brown, E.T. Progress and challenges in some areas of deep mining / E.T. Brown // *Mining Technology*, 2012. – Vol. 121. – No 4. – P. 177–191.
3. Donnelly, L.J. A review of international cases of fault reactivation during mining subsidence and fluid abstraction / L.J. Donnelly // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2009. – Vol. 42. – P. 73–94.
4. Aronov, A.G. Stress state of the earth's crust and seismicity in a potassium salt mining region in Belarus / A.G. Aronov, Sh.A. Mukhamediev, T.I. Aronova // *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2014. – Vol. 49, Issue 2 (June) – P. 125–134.
5. Aronov, A.G. Seismicity and the stressed state of the Starobin potassium salt deposit in Belarus / A.G. Aronov, Sh. A. Mukhamediev, T.P. Belousov, T.I. Aronova, R.R. Seroglazov // *Геодинаміка*, 2014. – № 1 (16). – С. 88–95.
6. Мухамедиев, Ш.А. Тектонические напряжения и сейсмичность в районе Старобинского месторождения калийных солей / Ш.А. Мухамедиев, А.Г. Аронов, Т.И. Аронова // *Літасфера*. – 2014. – № 1 (40). – С. 50–57.
7. Аронов, А.Г. Сейсмичность территории Беларуси / А.Г. Аронов, Р.Р. Сероглазов, Т.И. Аронова // *Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: в 2 кн. / Кн. 1: Землетрясения / под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина*. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 350–364.
8. Аронов А.Г., Сероглазов Р.Р., Аронова Т.И. Сейсмичность и сейсмостектоника / А.Г. Аронов., Р.Р. Сероглазов, Т.И. Аронова // *Сейсмостектоника плит древних платформ в области четвертичного оледенения: под ред. Р.Г. Гарецкого, С.А. Несмеянова*. – М.: Книга и Бизнес, 2009. – С. 122–137.
9. Функциональные возможности программы WSG. – Обнинск: НПП «Геотех» и ГС РАН, 2007. – 73 с.

БЕЛАРУСЬТАҒЫ КАЛІЙ ТҰЗДАРДЫҢ СТАРОБІНСК КЕНОРНЫ АУДАНЫНДА ИНДУКЦИЯЛАНҒАН СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ МОНИТОРИНГІ

Аронов А.Г., Аронов Г.А.

*Беларусь Ұлттық ғылыми академиясының Геофизикалық мониторинг орталығы,
Минск, Беларусь Республикасы*

Беларусьтағы калий тұздардың Старобинск кенорнында 1983 жылдан бастап 2017 жыл бойынша өткізілген ұзақ уақытты сейсмологиялық мониторингтің нәтижелері келтірілген. Табиғи тектоникалық күштердің әсер етуіне ұшыраған деңгейжиктегі кернеудің өзгеруінен жарылымдарды активтендіруімен туындаған, бағытталған сейсмикалылықтың көріністері мен тау жыныстарының жерасты қазып алуларымен шартталған сейсмикалылық қарастырылды. Сейсмикалылықтың кеңістіктік көріністері шахталық жазықтықтардың шегінен шығып, тікелей тау жұмыстарының ауданына жалғасып тұрған аумақты қамтитыны белгілі болды.

Выводы

Вопрос о природе сейсмических событий в Солигорском горнопромышленном районе весьма актуален в научном и практическом отношении. Учитывая происходящие в течение длительного времени изменения напряженного состояния геологической среды, вызванные выемкой и перемещением горных пород и их складированием в соляных отвалах, можно предположить, что землетрясения связаны с наведенной сейсмичностью и имеют техногенный характер. При длительной разработке Старобинского месторождения калийных солей были нарушены равновесные условия, что вызвало критическое перераспределение напряжений в разрабатываемом пласте и вмещающих породах и привело к возникновению индуцированной сейсмичности в районе месторождения.

Анализ данных мониторинга показал, что проявление сейсмичности за пределами зоны промышленных выработок служит признаком того, что с определенного времени сейсмический процесс в основном связан с региональными геодинамическими факторами и в меньшей степени зависит от работы горных предприятий.

Сейсмикалылықтың жоғарлауының орташаланған сипаттамалары өткізілетін тау жыныстарын қазып алулардың ерекшеліктеріне соншалықты байланысты емес, және де бірінші кезекте аймақтағы жарылымдардың геометриясы мен аймақтық тектоникалық кернеулердің сипаттамаларымен белгіленеді.

**INDUCED SEISMICITY MONITORING IN THE REGION
OF THE STAROBIN POTASSIUM SALT DEPOSIT OF BELARUS**

A.G. Aronov, G.A. Aronov

Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The paper presents the results of a long-term seismological monitoring within the Starobin potassium salt deposit of Belarus carried out since 1983 till 2017. The seismicity not directly caused by specific deposit mining conditions, but due to the underground rock excavations is discussed. The fact of the induced seismicity manifestation is caused by the fault activation in the salt mining region as a result of changing the stress conditions in the horizons subject to the action of the natural tectonic forces. Spatially, the seismicity manifestations are observed beyond the mine field limits and involve the territories adjacent to the mining region. The averaged values of the seismicity increase are weakly dependent on the mining excavation features, but, firstly, on the geometry of the faults found in the region and the pattern of the regional tectonic stresses.