

УДК 550.34.06

**ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЛОЖНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА
В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ
НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ В ШАХТАХ ДОНБАССА**

**А. В. Анциферов, В. В. Туманов, Л. А. Новгородцева,
А. Ю. Грицаенко, Д. С. Бородин**

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела,
E-mail: ranimi@ranimi.org, ул. Челюскинцев, 291, 83004, г. Донецк, Россия*

При изучении геодинамического состояния углепородного массива на шахтах Донбасса используется сложный суммарный сигнал, возникающий на земной поверхности при отработке угольных пластов. Поиск закономерностей в геологическом отклике массива на прохождение в нем сейсмических волн строится на основных физических принципах теории упругости: зависимости энергетических показателей сигнала от близости источника колебаний и зависимости скоростей продольных волн от плотности среды.

Рассмотрены результаты сейсмического мониторинга на шахтных полях Донецко-Макеевского района Донбасса. Проведено сопоставление энергетических и спектральных характеристик сигналов с геодинамическими процессами и параметрами геологического разреза. Установлена прямая пропорциональная зависимость между суммарной мощностью трещиноватых пород и комплексным параметром, включающим азимут одной из компонент сейсмических волн. Исследование спектров сложного сигнала показывают, что их частотные характеристики позволяют дифференцировать участки максимального разуплотнения и уплотнения углепородного массива и в конечном итоге оконтурить зоны влияния разломов, являющихся участками аномального скопления метана.

Шахтные поля, трещиноватые зоны, тектонические разломы, геодинамические процессы, поверхностные волны, волны Рэлея, мониторинг, сейсмические сигналы, микросейсмы, компоненты, амплитуды, спектры

DOI: 10.15372/FTPRPI20240607

EDN: YUWTOJ

Определение уровня опасности геодинамических событий, возникающих в недрах Земли при разработке угольных месторождений и месторождений полезных ископаемых, является приоритетным научным направлением для горнодобывающей промышленности как в РФ, так и за рубежом. Научным сообществом рассматриваются многочисленные аспекты этой сложной проблемы, в том числе:

- изменение физических характеристик массива при ведении очистных работ: исследуются типы сейсмических волн, их спектры, динамические и кинематические характеристики [1–3];
- создание компьютеризированных технологий наблюдений за микросейсмическим полем как внутри, так и на поверхности работающих шахт; определение гипоцентров сейсмических событий, связанных с очагами активного трещинообразования [4–7];

- совершенствование приемов обработки, интерпретации и повышения разрешения при визуализации результатов сейсмических наблюдений [8, 9];
- развитие теории расчета синтетических сейсмограмм от однородной до слоистой среды с целью аппроксимации реального геологического разреза [10–12].

В настоящей работе обобщен опыт, который главным образом относится к первому направлению исследований и является некой альтернативой существующим в Донбассе системам акустического мониторинга для прогноза газодинамических явлений [13, 14]. Например, в некоторых шахтах до настоящего времени выполняется текущий прогноз выбросоопасности, основанный на сейсмоакустической активности пласта, а именно регистрации с помощью звукоулавливающей аппаратуры ЗУА-98 естественных импульсов (звуковых щелчков), которые обусловлены процессами трещинообразования угольного пласта при ведении горных работ. Для прогноза опасных геодинамических зон определяются значения часовой и среднечасовой шумности, при этом характерным признаком зоны с опасным газодинамическим проявлением считается устойчивое превышение в два раза и более среднего значения часовой шумности, вычисленное за 30 ч.

Анализ эффективности работы подобных систем предотвращения газодинамических явлений показывает, что зачастую при прогнозе выбросоопасности приходится сталкиваться с ошибками 1-го и 2-го рода, а их достоверность близка к 60–70 % даже с учетом дополнительных способов контроля с использованием аппаратуры АПСС разработки МакНИИ [15, 16]. Эффективное применение таких систем мониторинга ограничено недоучетом газовой составляющей прогноза, а также наличием в горных выработках мощных нестационарных техногенных источников акустического сигнала, которые в сложных горно-геологических условиях могут привести к существенному отклонению расчетных параметров от принятых в нормативных документах.

Наиболее активно данными вопросами сотрудники РАНИМИ стали заниматься более 15 лет назад в рамках интеграционного проекта совместно с учеными ИГД СО РАН, который был направлен на разработку систем мониторинга для прогнозирования опасных геодинамических и газодинамических процессов при отработке месторождений полезных ископаемых в условиях увеличения глубины разработки и усложнения геологического строения разрабатываемого массива горных пород [17]. Для примера в Донбассе в начале 2000-х годов происходило до 150 газодинамических явлений в год [18].

Так, в Донбассе над работающей лавой шахты “Красноармейская-Западная № 1” проведены режимные сейсмические наблюдения, целью которых являлось исследование закономерностей поведения сейсмического поля по мере продвижения очистного забоя. Наблюдения выполнялись на профиле, разбитом на несколько одинаковых по длине (50 м) интервалов зондирования (рис. 1). Интервалы выбирались с учетом необходимости разделения различных групп волн (головных, рефрагированных и др.) для обеспечения возможности изучения их кинематических и энергетических показателей.

Условия зондирования принимались одинаковыми для всех циклов наблюдений, осуществленных 02.10, 14.10, 17.10 и 23.10.2008 г., при этом регистрация сейсмического сигнала выполнялась в двух разнесенных точках профиля для его последующего нормирования по мощности колебаний в источнике.

Как показали результаты мониторинговых сейсмических наблюдений, происходящие в результате подработки геодинамические процессы наиболее отчетливо проявляются в энергетических показателях сейсмического сигнала (рис. 2). Их увеличение на втором интервале зондирования (рис. 2б) по отношению ко второму циклу наблюдений составляет более 3 раз с последующим таким же спадом, а на третьем интервале зондирования (рис. 2в) возрастание составляет 6 раз с последующим спадом до 10 раз. При этом на первом интервале зондирования от-

мечаются совершенно другие закономерности (рис. 2а), что позволяет с большой долей вероятности связать аномальный характер поведения энергетических параметров сейсмического поля с геодинамическими процессами над областью очистных горных работ.

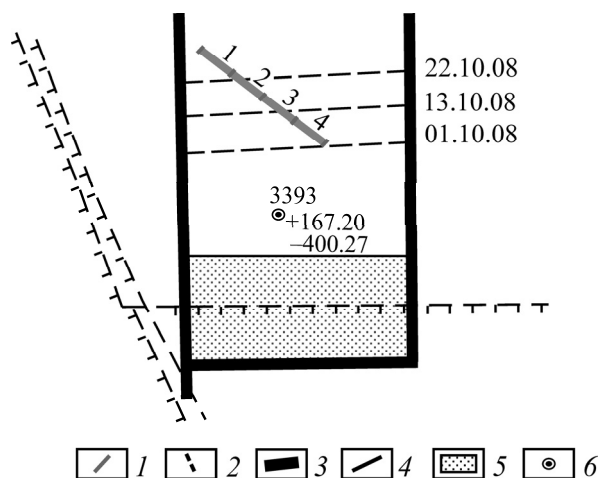


Рис. 1. Схема объекта экспериментальных исследований над 1-й северной лавой шахты “Красноармейская-Западная № 1”: 1 — профиль проведения исследований, разделенный на интервалы; 2 — тектонические нарушения на участке; 3 — положение горных выработок в момент отработки лавы; 4 — положение фронта лавы на момент проведения мониторинга; 5 — площадь нарушенных пород на уровне пересечения выработки со сбросом; 6 — скважина геологической привязки

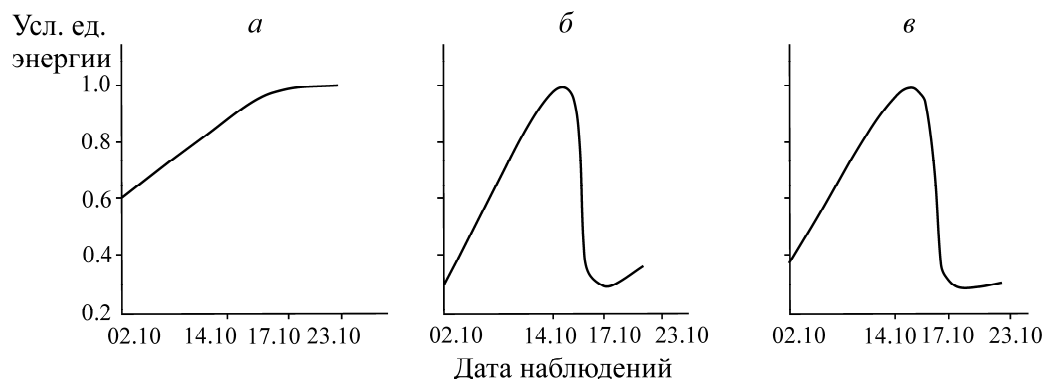


Рис. 2. Характер изменения энергетических показателей сейсмических волн в процессе режимных наблюдений на разных интервалах зондирования в рамках одного цикла зондирования: а, б, в — соответственно первый, второй и третий интервалы зондирования

В рамках интеграционного проекта выполнены наблюдения пассивных сейсмических сигналов, главным итогом которых стало установление прямой связи амплитуд и характера микросейсмических колебаний с интенсивностью происходящих в результате отработки угля геодинамических процессов. Спектральный анализ свидетельствует о распределении основной энергии сигналов в частотном диапазоне от единиц до 10–12 Гц (рис. 3).

Важный этап научных исследований по вопросам проведения мониторинговых сейсмических наблюдений на шахтных полях Донбасса начался в 2020-е годы, когда на поле шахты “Калиновская–Восточная” был организован мониторинг и велась непрерывная регистрация сейсмических событий станцией “Ермак” с целью установления природы фиксируемых в жилой застройке подземных толчков. Основным результатом мониторинга стало определение эпицентра зоны, в пределах которой располагались источники сейсмических макрособытий.

Их происхождение связано с горными работами и сложными горно-геологическими условиями угледобывающего района [19]. Такого рода мониторинговые наблюдения должны проводиться и на других подрабатываемых территориях Донбасса, однако особого внимания заслуживает направление исследований по созданию геолого-геофизической модели аномальных скоплений метана на шахтных полях. Геофизические аспекты этих исследований предусматривают широкое использование метода низкочастотного (пассивного) сейсмического зондирования для изучения скоплений метана в толще углепородного массива.



Рис. 3. Обобщенные спектры низкочастотных сейсмических колебаний и микросейсм над областью очистных работ

Метод низкочастотного сейсмического зондирования получил распространение в нефтегазовой геологии за рубежом [20, 21]. Главная предпосылка успешного использования метода заключается в том, что модификации спектра микросейсм в частотном диапазоне 0.5–20 Гц существенно отличаются при его взаимодействии с геологическими структурами, содержащими заполненные углеводородами поры, в сравнении с аналогичными структурами, содержащими воду. Кроме того, обработка наблюдаемого микросейсмического поля с использованием специальных методических приемов может помочь в прогнозе зон тектонической нарушенности и трещиноватости [22]. При этом полученные многомесячные сейсмозаписи на поле шахты “Калиновская–Восточная” могут служить экспериментальной основой для проведения указанных исследований.

На рис. 4 показан фрагмент сейсмозаписи, полученной для часового временного интервала от 5 до 6 ч утра, на котором техногенный фактор сведен к минимуму.

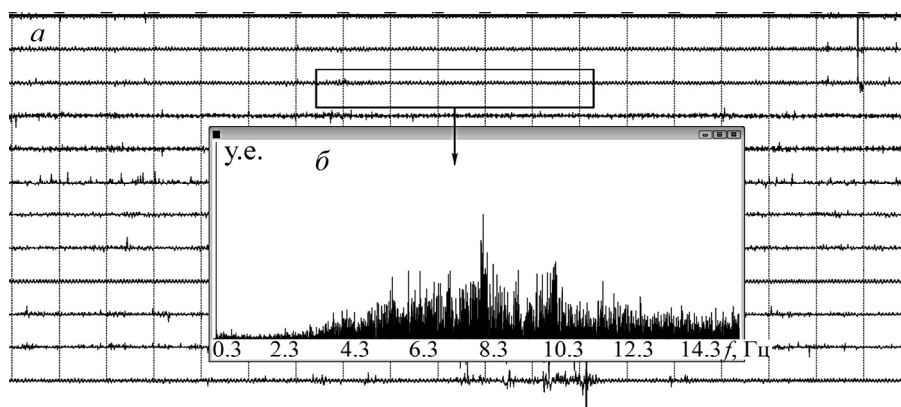


Рис. 4. Типичные сейсмограммы микросейсмических измерений на поле шахты “Калиновская–Восточная” (а) и полученный относительный спектр (б) вертикальной компоненты вектора колебаний

В выбранном частотном диапазоне вполне приемлемо проведение спектрального анализа, по результатам которого выделяются аномальные области спектра. В настоящее время в ФГБ-НУ “РАНИМИ” разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять чтение и обработку сейсмических записей значительной длительности. В разработанном ПО доступны операции фильтрации с широким набором фильтров, различные варианты нормировки, а также представлены инструменты обработки результатов мониторинга на основе анализа амплитудно-частотных, энергетических характеристик как сейсмозаписей в целом, так и отдельных микросейсмических событий, а также средства выделения и анализа шумов искусственного и естественного происхождения [23].

Для анализа сейсмозаписей использовались результаты исследований, полученные при разработке метода микросейсмических зондирований [24–29]. Речь идет об экспериментально доказанном положении, основанном на том, что относительно плотные и монолитные участки геологической среды, характеризующиеся повышенными сейсмическими скоростями, идентифицируются по пониженным амплитудам поверхностных волн, а зоны трещиноватости тектонической или иной природы проявляются в микросейсмическом поле таких волн как области с повышенными амплитудами смещений (или скоростей смещений) грунта.

В отличие от подавляющего числа измерений, где используются природные источники поля (океанические прибои, штормы и т.п.) и измерения ведутся в низкочастотной области от 0.2 до 10 Гц, в Донбассе из глубины массива идут техногенные сейсмические сигналы, которые, достигая поверхности, превращаются в волны Рэлея и смешиваются с другими волнами природного и техногенного происхождения.

Различные компоненты волн по-разному усиливаются геологическим разрезом со слоистой структурой, горизонтальные колебания усиливаются за счет многократного отражения S -волн, тогда как вертикальные — за счет многократного отражения P -волн. В то же время, зная, что поверхностные искусственные источники микросейсм генерируют в основном вертикальные колебания, можно по соотношению вертикальных и горизонтальных спектральных характеристик оценить природу сигнала. Участки профиля наблюдений, где значения таких соотношений значительно превышают единицу и преобладают вертикальные компоненты смещения, можно рассматривать как малоинформативные с точки зрения геологической интерпретации микросейсмических данных.

Теоретические представления находят свое подтверждение при анализе максимальных амплитуд скоростей смещения грунта по данным мониторинговых наблюдений на поле шахты “Калиновская-Восточная” ($A_{\max}$). Используя значения угла между осью Y и линией простирания ближайшего к каждому датчику разлома, предложен комплексный параметр $K_{\Pi} = S \cos \alpha / \sqrt{R}$, где S — суммарная мощность трещиноватых пород в ближайшей к датчику скважине; α — угол между осью E (восток) и ближайшим к датчику тектоническим нарушением; R — расстояние от техногенного источника колебаний, который позволяет дать графическую иллюстрацию совпадения теоретических представлений и экспериментальных данных (рис. 5).

Таким образом, используя предложенный подход и имея данные большого количества измерений, можно получить уравнение регрессии для количественной оценки трещиноватости массива в пространстве между скважинами.

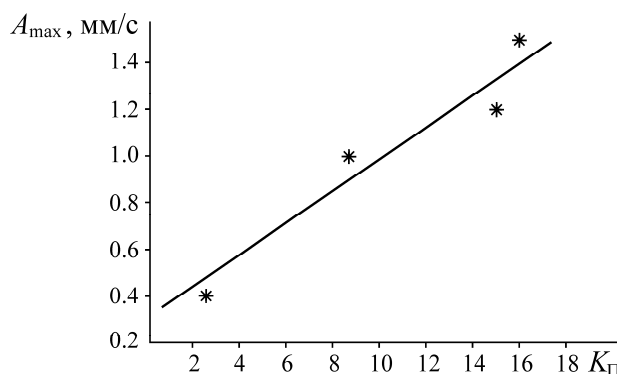


Рис. 5. Зависимость значений $A_{\max}$ от комплексного параметра K_{Π}

ВЫВОДЫ

Геодинамические и сейсмические процессы, связанные с горными работами, создают в сейсмических и микросейсмических полях регистрируемые аномалии, которые в перспективе могут улучшить прогноз интересующих участков на шахтных полях Донбасса.

При анализе напряженного состояния горных пород использование энергетических показателей сейсмических сигналов является достаточно перспективным. Изменение показателей может измеряться значениями до одного порядка.

Учитывая ограниченность базы проведенных мониторинговых наблюдений на поле шахты “Калиновская – Восточная” (участок размером 700×500 м), применяемые в работе методические подходы нуждаются в дальнейшем экспериментальном обосновании с учетом оценки флюидного содержания искоемых зон трещиноватости в районах динамического влияния разломов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mendecki A. J. and Niewiadomski J. Spectral analysis and seismic source parameters, Seismic Monitoring in Mines, ed. Mendecki A. J., Chapman and Hall, London, 1997. — P. 144–158.
2. Рыжов В. А. Характерные параметры сейсмоакустического сигнала при поиске залежей углеводородных флюидов // Материалы ХТВ Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов”. — М.: СП “Мысль”, 2007. — Т. 2. — С. 129–130.
3. Гликман А. Г. О формировании упругих колебаний в слоистых средах // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. — 1999. — № 6. — С. 25–29.
4. Wollnik F., Vom Berg B., and Hoffmann K. OG-Netz-basierte Digitalisierung für das Monitoring von Tagesöffnungen im Nachbergbau und andere Anwendungen, GeoResources (4-2020). — P. 33–36.
5. Mutkea G., Kotyrbaa A., Lurkaa A., Olszewskab D., Dykowski P., Borkowskid A., Araszkievicze A., and Baranskif A. Upper Silesian geophysical observation system — A unit of EPOS project, J. Sustainable Min., Vol. 18, Issue 4, November 2019. — P. 198–207.
6. Drzewiecki J. and Myszlowski J. Mining-induced seismicity of a seam located in rock mass made of thick sandstone layers with very low strength and deformation parameters, J. Sustainable Min., Vol. 17, Issue 4, 2018. — P. 167–174
7. Азаров А. В., Сердюков А. С., Яблоков А. В. Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтально-слоистых средах // ГИАБ. — 2016. — № 10. — С. 131–143.

8. **Логинов Г. Н., Яскевич С. В., Дучков А. А., Сердюков А. С.** Совместная обработка данных поверхностных и подземных систем микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 5 — С. 100–107.
9. **Шахова Е. В.** Экспресс-методика для определения микросейсмической активности платформенных территорий (на примере Архангельской области): автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2008. — 24 с.
10. **Шмаков В. Д.** Программный комплекс решения обратных кинематических задач микросейсмического мониторинга // Вестн. НГУ. Серия: Информ. технологии. — 2010. — Т. 8. — Вып. 2 — С. 34–42.
11. **Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Анциферов В. А.** Сейсмическая разведка углепородных массивов. — Донецк: Вебер, 2008. — С. 17–33.
12. **Анциферов А. В.** Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк: ТОВ “АЛАН”, 2003. — 213 с.
13. **Опарин В. Н.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов: Том 1. — Новосибирск: СО РАН, 2009. — 304 с.
14. **Коболев В. П.** Пояса безопасности угольных шахт Донбасса. // Геотехнологии. — 2019. — Т. 2. — С. 1–11.
15. **Булат А. Ф., Макеев С. Ю., Каргаполов А. А., Андреев С. Ю., Звягильский Е. Л., Ефремов И. А., Ставицкий П. Г.** Контроль изменения состояния массива многоканальной сейсмоакустической системой на шахте им. А. Ф. Засядько // Геотехническая механика, — 2010. — Вып. 88. — С. 25–33.
16. **Деглин Б. М., Мелконян А. А., Широких Н. В.** Опыт применения звукоулавливающей аппаратуры нового поколения “Зуа-98” // ГИАБ. — 2004. — № 9. — С. 92–95
17. **Коптиков В. П., Бокий Б. В., Минеев С. П.** Совершенствование способов и средств безопасной разработки угольных пластов, склонных к газодинамическим явлениям // Донецк: ИПП “Проминь”. — 2016. — 480 с
18. **Брюханов А. М., Коптиков В. П., Колчин Г. И., Никифоров А. В.** Акустический контроль динамики напряженно-деформированного состояния горного массива // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: Междунар. науч.-техн. конф.; 11-15 окт. 2004. — Донецк, 2004. — Ч. 1. — С. 459–463
19. **Анциферов А. В., Туманов В. В., Лобков Н. И., Бородин Д. С., Шалованов О. Л., Базеева Р. П.** Мониторинг техногенной сейсмичности в зоне влияния угольных шахт Донбасса (на примере ш. “Калиновская–Восточная” ГП “Макеевуголь”) // Тр. РАНИМИ. — Донецк, 2020. — № 9 (24). — С. 78–87.
20. **Graf R., Schmalholz M., Podladchikov Y., and Saenger H.** Passive low frequency spectral analysis: Exploring a new field in geophysics, World Oil. Geophys. methods. — 2007, USA. — P. 47–52.
21. **Lambert M.-A., Schmalhoz S.M., Saenger E.H., and Steiner B.** Low-frequency microtremor anomalies at an oil and gas field in Voitsdorf, Austria, European Association of Geoscientists & Engineers, Geophys. Prosp., 2009, Vol. 57. — P. 393–411.
22. **Nakamura Y.** A Method for Dynamic characteristics of subsurface using microtremor on the ground surface, Quartely Report of Railway Technical Institute, 1989, Vol. 30, No. 1. — P. 25–33.
23. **Анциферов А. В., Глухов А. А., Туманов В. В., Новгородцева Л. А.** О программном комплексе обработки результатов микросейсмического мониторинга углепородных массивов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2023. — Т. 10. — № 1. — С. 15–22.
24. **Горбатиков А. В.** Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля // Изменение окружающей среды и климата. — 2008. — Т. 1. — Ч. 2. — С. 223–236.

25. Цуканов А. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А. Численное моделирование эффекта сверхразрешения в методе микросейсмического зондирования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего востока России: тр. Четвертой науч.-техн. конф. РАН, Геофиз. служба, Камчатский филиал. — 2013. — С. 491–495.
26. Горбатилов А. В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирование // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Междунар. конф. — 2006. — С. 66–71.
27. Biryaltsev E. V. and Kamilov M. R. Method selection of microseismic studies depending on the problem being solved // Георесурсы. — 2018. — Т. 20. — № 3. — С. 217–221.
28. Бережной Д. В., Биряльцев Е. В., Биряльцева Т. Е., Кипоть В. Л., Рыжков В. А., Тумаков Д. Н., Храмченков М. Г. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды // Сб. НИИ математики и механики Казанского университета. — Казань. 2008. — С. 360–386.
29. Matsushima T. and Okada H. Determination of deep geological structures under urban areas using long period microtremors, Butsuri-Tansa, 1990, Vol. 43. — No. 1. — P. 21–33

Поступила в редакцию 15/VI 2024

После доработки 15/VI 2024

Принята к публикации 08/XI 2024