С О Д Е Р Ж А Н И Е

C O N T E N T S

МАТЕМАТИКА

УДК 515.5, 004.056.53
Специальность: 1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика

Академик НАН Таджикистана М.Илолов, Дж.Ш.Рахматов

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КИБЕРАТАК

Национальная академия наук Таджикистана,
Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана

В данной работе представлен оригинальный подход к описанию и прогнозированию кибератак на основе нечетких множеств и нечетких дифференциальных уравнений (НДУ). Включены исторический обзор развития метода, формулы, комментарии к уравнениям, численные примеры, графические иллюстрации и рекомендации по оптимизации защитных мер.

Ключевые слова: *нечеткие множества, нечеткие дифференциальные уравнения, SIR-модель в кибербезопасности, прогнозирование кибератак, оптимальное управление защитными ресурсами.*

1. Введение

Понятие нечетких множеств было введено Л.Заде в 1965 г., когда он показал, что классическая теория множеств слишком жестко описывает лингвистические понятия и неопределённые границы категорий [1]. Уже в конце 1970-х Дюа и Прад впервые обосновали нечеткие дифференциальные уравнения, формализовав динамику систем с нечеткими параметрами [2].

В 1992 г. Б. Коско связал нечеткую логику и нейронные сети, что привело к бурному развитию адаптивных систем, умеющих корректировать параметры «на ходу» [3]. В течение 1990-х и начала 2000-х годов отраслевые исследования применяли НДУ к биологическим, экологическим и экономическим моделям, но лишь в 2006 г. появились первые публикации о нечетких SIR-моделях распространения инфекций [4].

Начиная с 2010 г. методика нашла применение в эпидемиологии компьютерных сетей: первая Fuzzy-SIR для моделирования сетевых червей была предложена в работах Мира и Фернандеса (2012), а в 2018 г. Ян и соавторы продемонстрировали, как НДУ прогнозируют всплески DDoS-атак с учётом неопределённости данных мониторинга [5].

Последние исследования включают Delay Differential Equation (DDE), то есть «дифференциальное уравнение с запаздыванием» для учёта времени реакции службы безопасности и методы оптимального управления ресурсами защиты [6-8]. Смежные вопросы в области нечетких и стохастических дифференциальных уравнений рассматриваются в работах [9-12].

Тем не менее комплексная система, объединяющая исторические наработки аппарата нечетких множеств и современные требования к киберзащите, остаётся недостаточно разработанной.

Адрес для корреспонденции: *Рахматов Джамшед Шавкатович, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Рудаки, 33 а, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана. E-mail: jamesd007@rambler.ru.*

Современные кибератаки развиваются в условиях неполноты и неточности данных: логи сетевого трафика бывают шумными, экспертные оценки — лингвистическими. Нечеткая логика даёт формальный инструмент для моделирования «частичной истины» и интеграции качественных оценок в динамические уравнения. В этой работе мы синтезируем исторические подходы и построим механизм прогнозирования и оптимизации защиты.

2. Математическая модель

2.1. Нечеткие параметры

Параметры интенсивности атаки $\tilde{\beta}$ и скорости восстановления $\tilde{\gamma}$ описываются тройными нечеткими числами:

$$\tilde{\beta} = (\beta_L, \beta_M, \beta_R),$$

$$\tilde{\gamma} = (\gamma_L, \gamma_M, \gamma_R).$$

Здесь β_M и γ_M — наиболее вероятные значения, границы (β_L, β_R) и (γ_L, γ_R) отражают экспертную неопределённость. Функция принадлежности нечеткого треугольного числа $\tilde{\beta}$ задаётся:

$$\mu_{\tilde{\beta}}(x) = \begin{cases} 0, & x \le \beta_L, \\ \dfrac{x - \beta_L}{\beta_M - \beta_L}, & \beta_L < x \le \beta_M \\ \dfrac{\beta_R - x}{\beta_R - \beta_M}, & \beta_M < x \le \beta_R \\ 0, & x \ge \beta_R. \end{cases}$$

Она позволяет плавно описывать степень уверенности в каждом значении параметра.

2.2. Динамика SIR–модели

Адаптируем классическую SIR–систему для сетей:

$$\frac{dS}{dt} = -\tilde{\beta}(t)\frac{S(t)I(t)}{N}, \tag{1}$$

$$\frac{dI}{dt} = \tilde{\beta}(t)\frac{S(t)I(t)}{N} - \tilde{\gamma}(t)I(t), \tag{2}$$

$$\frac{dR}{dt} = \tilde{\gamma}(t)I(t). \tag{3}$$

Уравнение (1) показывает скорость перехода узлов из уязвимых в зараженные, уравнение (2) – баланс инфицирования и восстановления, а уравнение (3) – накопление защищённых узлов.

2.3. Метод α -срезов

Для каждого $ $\alpha \in [0,1]$ $ формируются интервалы

$$\beta^{\alpha} = \left[\beta_L^{\alpha}, \beta_R^{\alpha}\right], \quad \gamma^{\alpha} = \left[\gamma_L^{\alpha}, \gamma_R^{\alpha}\right],$$

где

$$\beta_L^{\alpha} = \beta_L + \alpha\left(\beta_M - \beta_L\right), \quad \beta_R^{\alpha} = \beta_R - \alpha\left(\beta_R - \beta_M\right).$$

Далее по вершинному методу строится «коридор» траекторий.

3. Расчётные показатели

3.1. Число воспроизводства атаки

Аналог R_0 вводим как отношение интенсивности к восстановлению:

$$R_0 = \frac{\tilde{\beta}}{\tilde{\gamma}}, \quad R_0^{\alpha} = \frac{\beta^{\alpha}}{\gamma^{\alpha}}.$$

Если $R_0^{\alpha} > 1$, атака растёт; при $R_0^{\alpha} < 1$ — затухает.

3.2. Время пика заражения

Для каждого α оценка времени t_{peak}^{α}:

$$t_{\text{peak}}^{\alpha} = \frac{1}{\beta^{\alpha} - \gamma^{\alpha}} \ln\left(\frac{\beta^{\alpha} S_0}{\gamma^{\alpha}}\right).$$

3.3. Критерий оптимального управления

Управляющая функция $u(t) \in [0,1]$ моделирует интенсивность защитных мер.

$$J\left[u(\cdot)\right] = \max_{\alpha}\left(\max_{t\in[0,T]} I_{\alpha}(t)\right) + \lambda\int_0^T C\left(u(t)\right)dt.$$

Минимизируя J, мы одновременно снижаем пик заражения и затраты.

4. Результаты моделирования

Численные примеры подтверждают эффективность подхода:

- В локальной сети $\left(N = 500, S_0 = 490, I_0 = 10\right)$, где N – общее число узлов (хостов) в смоделированной сети; S_0 – число уязвимых (susceptible) узлов в момент $t = 0$; I_0 – число сразу скомпрометированных (infected) узлов в момент $t = 0$ пик при средних параметрах, приходится на 8-й день, интервал 6-11 дней.
- Задержка патчей на $\tau = 3$ дня повышает максимум заражённых на $\approx 35\backslash\%$.

5. Иллюстрации

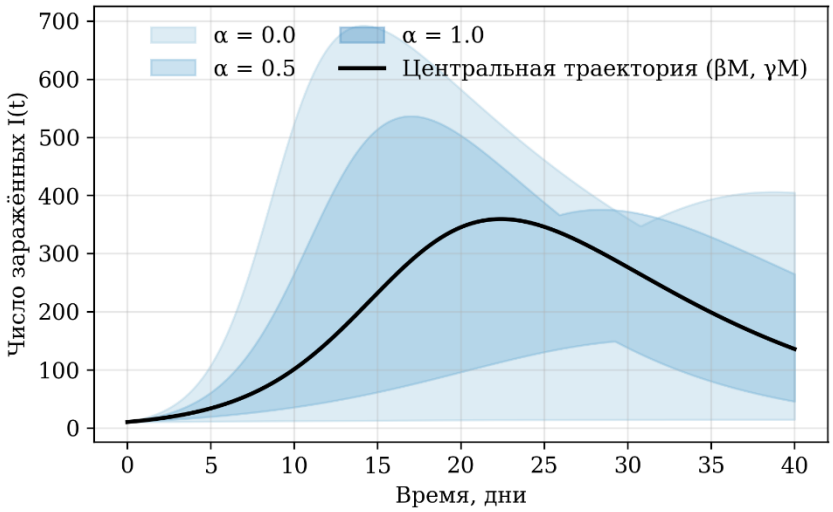


Рис. 1. Коридор прогнозов при разных уровнях α. Центральная кривая соответствует (β_M, γ_M)

Как видно на рис. 1, диапазон значений $I(t)$ расширяется при увеличении неопределённости.

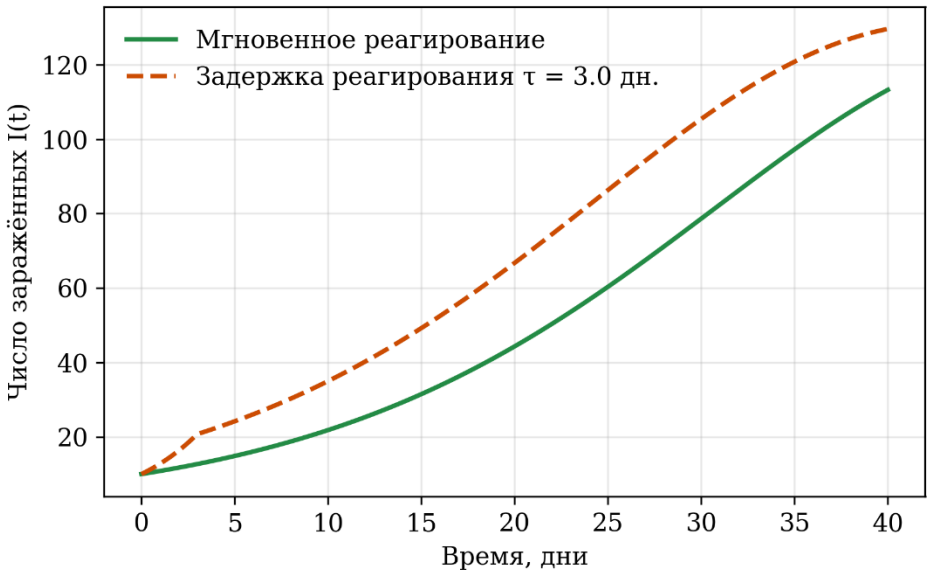


Рис. 2. Траектории заражения: мгновенное (сплошная) и задержанное (пунктир) реагирование при $\tau = 3$ дня.

Рис. 2 демонстрирует, что задержка даже на несколько дней сдвигает и увеличивает пик.

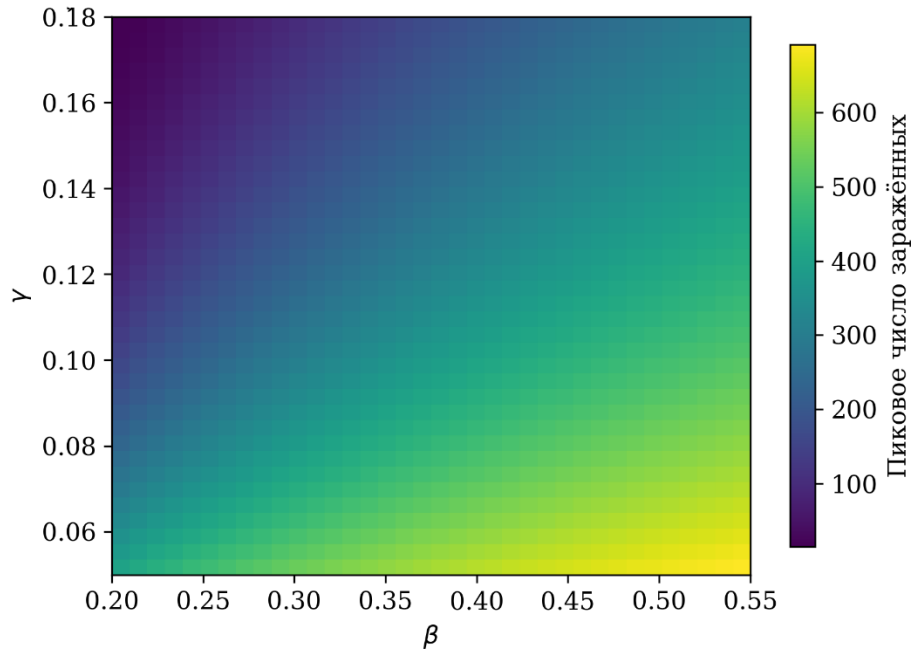


Рис. 3. Тепловая карта пикового числа заражённых при варьировании β и γ.

Рис. 3 показывает зоны высокого риска (жёлтые области) и безопасные зоны.

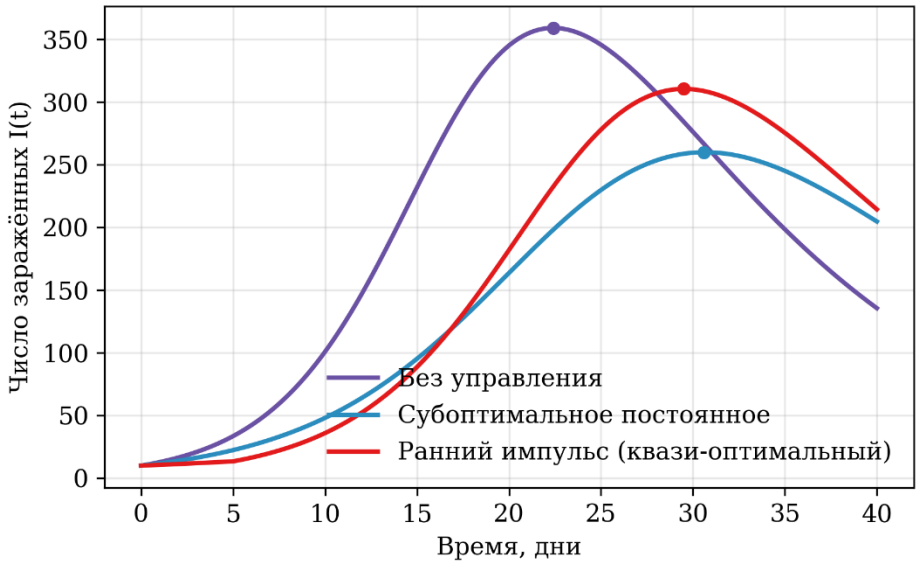


Рис. 4. Сравнение стратегий управления: без мер, субоптимальное постоянное и ранний импульс.}

На рис. 4 оптимальная стратегия снижает пик более чем на 40\%.

6. Методологическая новизна

В данной работе впервые предложена целостная схема, объединяющая:

- использование тройных нечетких чисел для одновременной формализации экспертных оценок и варьирования параметров модели;
- интеграцию классической SIR–структуры с DDE–запаздыванием для учёта времени реакции SOC;
- применение vertex–метода по α–срезам для построения «коридора прогнозов» и визуальной оценки неопределённости;

- чёткую формализацию критерия оптимального управления, связывающего максимальный пик заражения и ресурсный бюджет защитных мер;
- полную воспроизводимость результатов через открытый код генерации иллюстраций и численного интегрирования.

Таким образом, хотя сами составляющие (нечеткие числа, SIR, DDE, MPC-управление) давно известны, их одновременное применение, подробно расписанное с аналитическими выкладками и готовым кодом, представляет собой оригинальный вклад в область математического моделирования киберугроз.

7. Заключение

Развитая в данной работе методика объединяет классические и исторические наработки НДУ, расширяя их применимость к задачам кибербезопасности. Результаты моделирования подтверждают гибкость и точность предложенного подхода.

Поступило 02.07.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. – Information and Control, 1965, 8(3), pp. 338-353.
2. Dubois D., Prade H. On the use of fuzzy sets in differential equations. – Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(1), pp. 3-20.
3. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. – Prentice Hall, 1992.
4. Li W., Chen S. Theory and applications of fuzzy differential equations. – J. Fuzzy Math., 2010, 18(2), pp. 123-140.
5. Yang L., Zhang Y., Sun J. Modeling cyber attack propagation using fuzzy epidemic models. – Computers & Security, 2018, 77, pp. 622-637.
6. Топорков В.В., Пастухов А.В. Применение нечеткой логики для анализа киберугроз. – Вестник МГТУ, 2020.
7. Hines J.W., Croft J., Flower J. Fuzzy modeling for cyber-physical security. – IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 2021.
8. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. – Wiley, 2016.
9. Ilolov M., Kuchakshoev K.S., Rahmatov J.S. Fractional stochastic evolution equations: Whitenoise model – Communications on Stochastic Analysis, 2020, 14(3-4), pp. 55-69.
10. Ilolov M., Lashkarbekov S., Rahmatov J.Sh. Fractional stochastic evolution equations with Balakrishnan's white noise. – Global and Stochastic Analysis, 2022, vol. 9, №3, pp.53-70.
11. Ilolov M., Rahmatov J.Sh., Lashkarbekov S. Stochastic equation of a porous medium with fractional laplacian and white noise. – Stochastic Modelling and Computational Sciences, 2023, vol. 3, №2, pp. 171-187.
12. Ilolov M., Kuchakshoev K., Mirshahi M., Rahmatov J. Sh. Nonlinear stochastic equation in epidemiology. – Global and Stochastic Analysis, 2023, vol. 10, №3, pp. 75-84.

М.Илолов, Ҷ.Ш.Раҳматов

ИСТИФОДАИ МУОДИЛАҲОИ ДИФФЕРЕНСИАЛИИ ҒАЙРИСАҲЕҲ БАРОИ ТАҲЛИЛ ВА ПЕШГӮИИ КИБЕР-ҲАМЛАҲО

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави АМИ Тоҷикистон

Дар кори мазкур як равиши аслии тавсиф ва пешгӯии ҳамлаҳои киберӣ дар асоси маҷмӯи ғайрисаҳеҳ ва муодилаҳои дифференсиалии ғайрисаҳеҳ пешниҳод карда мешавад. Он шарҳи таърихии таҳияи усул, формулаҳо, шарҳҳо дар бораи муодилаҳо, мисолҳои ададӣ, тасвирҳои графикӣ ва тавсияҳоро оид ба беҳсозии чораҳои муҳофизатӣ дар бар мегирад.

Калимаҳои калидӣ: *маҷмӯи ғайрисаҳеҳ, муодилаҳои дифференсиалии ғайрисаҳеҳ, модели SIR дар киберамният, пешгӯии ҳамлаи киберӣ, идоракунии оптималии захираҳои муҳофизатӣ.*

M.Ilolov, J.Sh.Rakhmatov

APPLICATION OF FUZZY DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR ANALYSIS AND PREDICTION OF CYBERATTACKS

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Center of Innovative Development of Science and New Technologies, NAS of Tajikistan

This paper presents an original approach to describing and predicting cyber-attacks based on fuzzy sets and fuzzy differential equations. A historical review of the method development, formulas, equation comments, numerical examples, graphical illustrations and recommendations for optimization of defense measures are included.

Key words: *fuzzy sets; fuzzy differential equations; SIR model in cyber security; prediction of cyber-attacks; optimal management of defense resources.*

Сведения об авторах:

1. Илолов Мамадшо – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАНТ, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ, заведующий отделом математического моделирования динамических процессов. E-mail: ilolov.mamadsho@gmail.com;
2. Рахматов Джамшед Шавкатович – кандидат физико-математических наук, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ, заместитель директора по науке. E-mail: jamesd007@rambler.ru.

МАТЕМАТИКА

УДК 536.46
Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

М.М.Кабилов[*,], З.Б.Шерматова[**], П.Б.Садриддинов[*,***], Б.Дж.Гулбоев[**], Н.Н.Степанова[*]**

ВЛИЯНИЕ ОТВОДА ТЕПЛА ИЗ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ НА СУБ- И СВЕРХАДИАБАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана,
****Российско-Таджикский (Славянский) университет,***
*****Таджикский национальный университет***

(Представлено академиком НАН Таджикистана М.И.Илоловым 02.07.2025 г.)

Проанализированы субадиабатические и сверхадиабатические режимы фильтрационного горения водородно-воздушной (ВВ) смеси. Анализ выполнен на основе наборов значений максимальных температур пористой среды и ВВ смеси, полученных из рассчитанных температурных профилей фаз. Установлено, что в рассматриваемой области параметров, при которых численно реализуются температурные профили пористой среды и ВВ смеси, сверхадиабатический режим не наблюдается, то есть максимальная температура пористой среды остаётся ниже адиабатической. Указанный результат получен при варьировании диаметра частиц пористой среды и коэффициента теплоотдачи в окружающую среду. Также установлено, что для каждого фиксированного значения коэффициента теплоотдачи из рассматриваемого диапазона существует такой диаметр частиц пористой среды, при превышении которого максимальная температура газовой смеси становится выше адиабатической. Кроме того, проанализированы и другие параметры волны горения на данной параметрической плоскости, а также их зависимость от скорости вдува смеси в пористый блок.

Ключевые слова: *горение, водородно-воздушная смесь, состав смеси, скорость волны, скорость вдува смеси, максимальная температура, коэффициент теплоотдачи, пористая среда, диаметр частиц, радиус трубки.*

Основной целью настоящей работы является исследование влияния теплоотвода на субадиабатические и сверхадиабатические режимы фильтрационного горения водородно-воздушной (ВВ) смеси. Актуальность данной темы обусловлена тем, что знание максимальной температуры пористой среды имеет важное значение для процессов сжигания промышленных отходов и низкокалорийных газов [1-3]. Значение фильтрационного горения газа (ФГГ) как важной составляющей различных технологических процессов, а также его особенности по сравнению с газофазным горением отмечены в работе [4]. В работе [5] представлены результаты численного определения пределов распространения стационарной волны фильтрационного горения метановоздушной смеси в зависимости от толщины,

Адрес для корреспонденции: *Кабилов Маруф Махмудович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/4, Институт математики им. А.Джураева НАНТ. E-mail: maruf1960@mail.ru.*

теплопроводности пористого элемента, состава и скорости вдува смеси на плоскости диаметра частиц и коэффициента теплоотдачи в окружающую среду. Это связано с важностью знания пределов распространения волны с практической и теоретической точки зрения и тем, что эти два параметра процесса (средний размер зерна пористой среды и уровень теплопотерь), можно менять в относительно широких пределах [6]. Отметим, что при спутном потоке и отсутствии теплопотерь равновесная температура однозначно будет сверхадиабатической. Теоретическое описание эффекта сверхадиабатичности впервые было представлено в работе [7]. Физической причиной достижения сверхадиабатических температур в зоне реакции является перераспределение тепла в продуктах сгорания фильтрующимся потоком газа. В результате конвективного переноса тепло, выделяющееся при химической реакции, локализуется лишь в части сгоревшего слоя, примыкающей к фронту горения, тогда как остальная часть продуктов остаётся холодной.

В связи с выше изложенными положениями в настоящей работе приведены результаты анализа максимальных температур пористой среды и ВВ смеси, а также закономерности изменения таких параметров как скорость волны, безразмерные координаты максимальных температур фаз и длины волны на плоскости диаметра частиц пористой среды и коэффициента теплоотдачи.

Отметим, что значения максимальных температур пористой среды и водородно-воздушной смеси получены на основе многочисленных температурных профилей фаз, которые, в свою очередь, являются результатом численного решения системы одномерных обыкновенных дифференциальных уравнений, записанных в системе координат, движущейся со скоростью волны U [3, 6, 8]. Сравнение расчётных значений скорости волны, полученных по соотношению [9] для различных скоростей вдува, составов водородно-воздушной смеси и при диаметре частиц 1 мм, с результатами численного расчёта [5] демонстрирует удовлетворительное согласование [10]. Это совпадение подтверждает обоснованность использования расчётных температурных профилей пористой среды и водородно-воздушной смеси.

Математическая модель. Математическая модель процесса распространения стационарной волны фильтрационного горения водородно-воздушной смеси представляет собой систему одномерных обыкновенных дифференциальных уравнений с граничными условиями, задаваемыми на бесконечности [1–3, 6, 8, 11]. В состав системы входят: уравнения теплопереноса в инертной пористой среде и газовой фазе, уравнение переноса массы недостающего компонента, уравнение сохранения полного количества вещества в потоке, а также уравнение состояния идеального газа при постоянном давлении.

$$
\begin{aligned}
&\rho_1 c_1(\upsilon_1 - U)\frac{dT_1}{dx} = -\alpha_c S_c(T_1 - T_2) + \rho_1 Q\eta_0 J, \quad \alpha_c = \frac{Nu\lambda_1}{d_{eff}}, \quad S_c = \frac{6\alpha_2}{d}, \\
&-\rho_2 c_2 U\frac{dT_2}{dx} = \alpha_2\lambda_2\frac{d^2T_2}{dx^2} + \alpha_c S_c(T_1 - T_2) + \alpha_{0,e}(T_0 - T_2), \quad \alpha_{0,e} = \frac{2\alpha_w}{R_w}, \\
&\rho_1(\upsilon_1 - U)\frac{dn}{dx} = -\rho_1 J, \; J = nk_0\exp(-E/RT_1), \\
&\rho_1(\upsilon_1 - U) = \rho_{10}(\upsilon_{10} - U), \quad \rho_1 T_1 = \rho_{10}T_0, \\
&Nu = 0.395\,\mathrm{Re}^{0.64}\,\mathrm{Pr}^{1/3}, \quad \mathrm{Re} = \frac{\upsilon_1 d_{eff}\rho_1}{\mu_1\alpha_1}, \; \mathrm{Pr} = \frac{c_p\mu_1}{\lambda_1}, \quad d_{eff} = \frac{2\alpha_1 d_s}{3\alpha_2}.
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} x \to -\infty: &\quad T_1 = T_0,\ T_2 = T_0,\ n = 1, \\ x \to +\infty: &\quad \frac{dT_1}{dx} = 0,\ \frac{dT_2}{dx} = 0,\ n = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь T_1, T_2 – температуры газа и пористой среды соответственно; n, η_0 – относительная и исходная массовая концентрация недостающего компонента смеси; υ_1 – скорость фильтрации смеси газов; ρ_1, ρ_2 – приведённые плотности фаз; c_p, c_2 – удельные теплоёмкости газа и пористой среды; λ_2 – эффективный коэффициент теплопроводности пористой среды; α_c – коэффициент поверхностного теплообмена между фазами; S_c – удельная поверхность частиц; $\alpha_{0,e}$ – объёмный коэффициент внешнего теплообмена; α_w – коэффициент теплоотдачи стенки трубки; R_w – радиус трубки; Q – тепловой эффект реакции; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; k_0 – предэкспонент; Nu, Re, Pr – числа Нусельта, Рейнолдьса, Прандтля соответственно; d_{eff} – эффективный диаметр; d – диаметр частиц пористой среды; α_1, α_2 – объёмные содержания фаз; μ_1 – динамическая вязкость газа.

Дополнительные расчёты температурных профилей фаз выполнены при следующих значениях физико-химических параметров пористой среды и водородно-воздушной смеси.

$$\rho_1^0 = 0.6\,кг/м^3,\ \rho_2^0 = 3000\,кг/м^3,\ c_p = 1000\,Дж/(кг\cdot K),\ c_2 = 660\,Дж/(кг\cdot K),\ \alpha_1 = 0.5,$$
$$\lambda_1 = 0,084\,Вт/(м\cdot K),\ \lambda_2 = 4\,Вт/(м\cdot K),\ T_0 = 300K,\ \eta_0 = 0.077,\ R_w = 0.09\,м,\ \upsilon_{10} = \{1;\ 2\,м/с\}$$
$$k_0 = 5\cdot 10^{10} c^{-1},\ E = 1,26\cdot 10^5\,Дж/моль,\ Q = 15131250\,Дж/кг,\ \alpha_w = \{200 \div 2000\,Вт/м^2 K\}$$

Обсуждение результатов и выводы. Для наглядности на рисунках 1 и 2 представлены два варианта расчётных профилей температур пористой среды и газовой фазы (ВВ-смеси). По оси абсцисс отложена продольная безразмерная координата, по оси ординат – температура в Кельвинах. Волны распространяются слева направо с постоянной скоростью, совпадающей с направлением потока смеси (спутная волна). В случае отсутствия теплоотдачи в окружающую среду максимальная температура пористой среды превышает адиабатическую и достигает равновесного значения. Подобная температурная картина наблюдается при значениях коэффициента теплоотдачи стенки трубки (радиусом 0.09 м) вплоть до 50 Вт/(м²·К). При дальнейшем увеличении коэффициента теплоотдачи наблюдается снижение максимальной температуры пористой среды. В передней части волны (справа от фронта распространения) температуры газовой и твёрдой фаз становятся различными и также снижаются. В настоящей работе рассмотрены случаи, когда температуры фаз в передней и хвостовой частях волны асимптотически стремятся к 300 К, что свидетельствует о сравнительно большом значении коэффициента теплоотдачи. Именно по этой причине максимальная температура пористой среды на всех рассмотренных рисунках (185) не превышает адиабатическую, несмотря на совпадение направления распространения волны с направлением потока, как было указано выше. В верхней части каждого рисунка

приведены значения характерных параметров, таких как скорость волны, скорость вдува смеси, диаметр частиц, состав смеси и другие характеристики. На рис. 1 приведены расчётные распределения температур пористой среды и ВВ-смеси, которые совпадают на протяжении волны горения, что соответствует однотемпературной модели. При этом замечаем, что координаты и значения максимальных температур фаз совпадают.

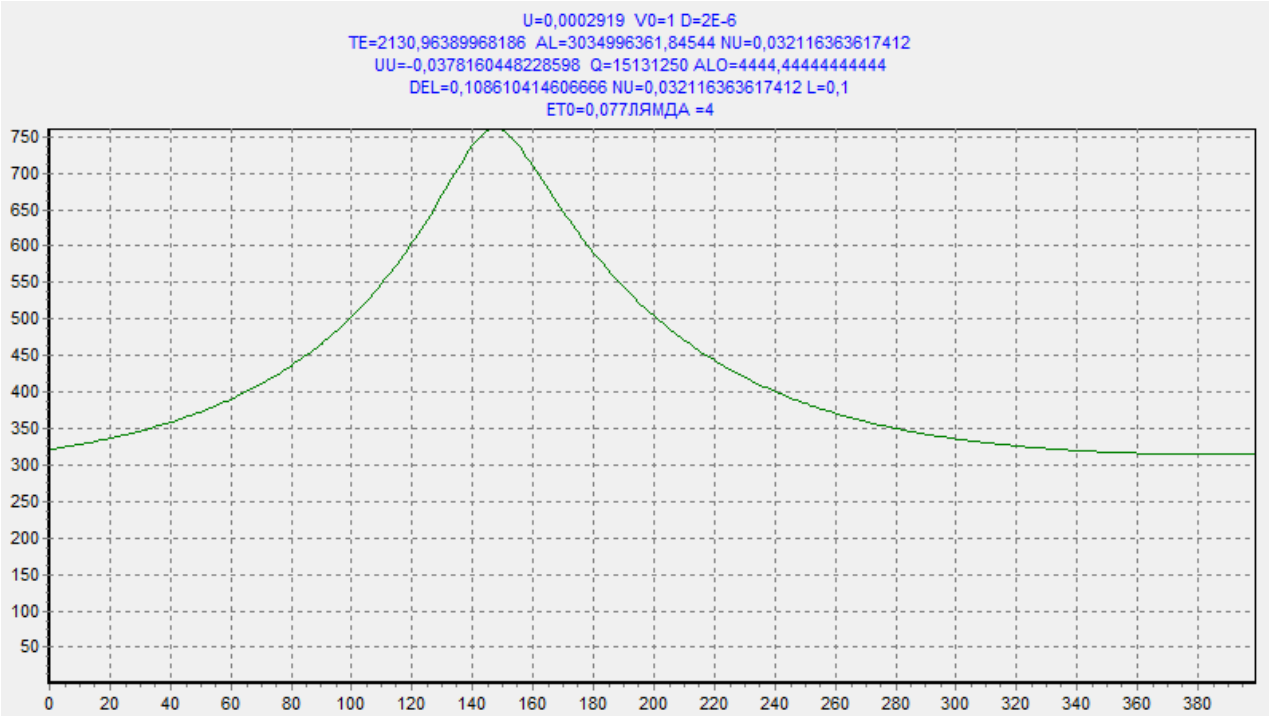


Рис. 1. Профили температур фаз при котором совпадают температуры фаз.

На рис. 2 представлены профили температур пористой среды и водородно-воздушной смеси, которые существенно отличаются друг от друга в узкой области впереди волны, при этом максимальные температуры также различаются, однако координаты максимальных температур совпадают. Отметим, что в работе [11] приведены результаты численного расчёта системы (1), демонстрирующие совпадение и расхождение координат максимальных температур пористой среды и ВВ-смеси при увеличении диаметра частиц для каждого фиксированного значения коэффициента теплоотдачи. На данной работе представлены данные максимальных температур пористой среды ($T_{2\max}$) и ВВ-смеси ($T_{1\max}$), скорость волны (U), координаты максимальных температур фаз ($X_{1\max}$ / $X_{2\max}$) и толщина волны (ℓ) на плоскости диаметра частиц и коэффициента теплоотдачи при скоростях вдува - $\upsilon_{10} = 1\ м/с$ и $\upsilon_{10} = 2\ м/с$, радиуса трубки $R_w = 0,09\ м$ и состава смеси 65%H_2+воздух.

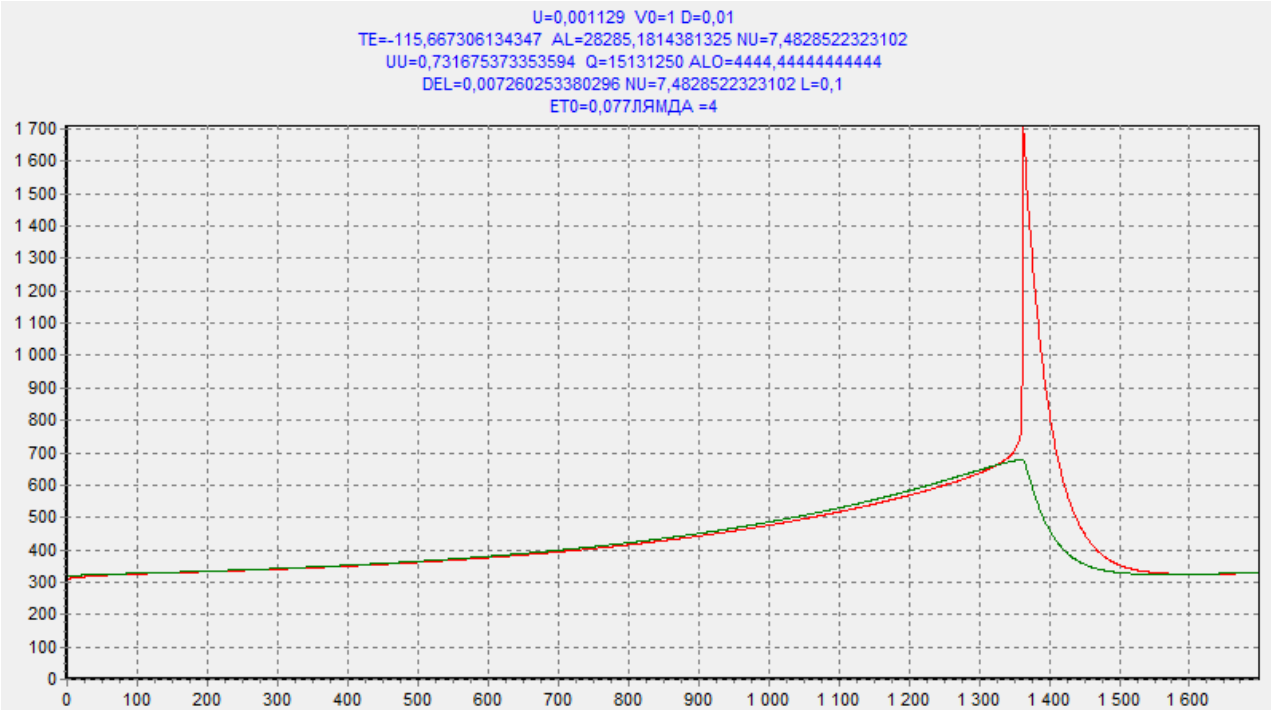


Рис. 2. Профили температур фаз при котором температуры фаз отличаются.

Заметим, что координаты максимальных температур фаз и толщина волны приведены в безразмерном виде, чтобы получить в размерных единицах их надо умножать на пропуск шагов при печати значений температур фаз (2000), на безразмерный шаг ($2\cdot10^{-6}$) и на характерный размер $L = 0.1 м$ (толщина огнепреградителя). Закономерности изменения параметров волны горения ВВ-смеси в инертной пористой среде следующее: для каждого фиксированного коэффициента теплоотдачи стенки существует свой диапазон изменения диаметра частиц пористой среды, где реализуются расчётные профили температур пористой среды и ВВ-смеси [11]. В этих диапазонах максимальные температуры фаз, их координаты, скорости волны и толщина волны увеличиваются до некоторого значения диаметра частиц пористой среды называемый критическим диаметром, а затем уменьшается. Для всех пар диаметра частиц и коэффициента теплоотдачи стенки максимальные температуры пористой среды не превышают адиабатическую, а максимальные температуры ВВ-смеси достигают своего максимума при критическом диаметре частиц. Скорость волны, координаты максимальных температур фаз и длина волны также достигают своего максимума на критическом диаметре частиц пористой среды. С увеличением коэффициента теплоотдачи правая граница диапазона частиц уменьшается, например, для коэффициента теплоотдачи стенки 200 Вт/м^{2}К соответствует 23 мм, а для 2000 Вт/м^{2}К – 1 мм. Противоположная тенденция наблюдается на нижних границах диапазонов при скорости вдува смеси $\upsilon_{10} = 1 м/с$, то есть происходит увеличение минимального диаметра частиц, например, при коэффициенте теплоотдачи стенки 1400 Вт/м^{2}К минимальный диаметр частиц равно 0.3 мм, а при 1600 Вт/м^{2}К и больше – 0.4 мм. Для скорости вдува смеси $\upsilon_{10} = 2 м/с$ нижняя граница диапазонов диаметра частиц не изменяется и равна 0.002 мм. В около критических диаметрах частиц наблюдается режим низких скоростей два (РНС2), то есть скорость волны порядка мм/с, это при скорости вдува $\upsilon_{10} = 2 м/с$, причём по мере увеличения коэффициента теплоотдачи до 2000 Вт/м^{2}К скорость волны уменьшается от

2.296 мм/с до 1.73 мм/с , а для скорости вдува $\upsilon_{10} = 1 м/с$ РНС2 реализуется при коэффициенте теплоотдачи стенки не больше 400 Вт/м²К .

В ы в о д ы

1. При горении водородно-воздушной смеси в инертной пористой среде максимальная температура не превышает адиабатическую в зависимости от диаметра частиц пористой среды и коэффициента теплоотдачи в окружающее пространство. Для фиксированного значения коэффициента теплоотдачи стенки в диапазоне 200-2000 Вт/(м²·К) существует соответствующий интервал диаметров частиц пористой среды.
2. При фиксированном диаметре частиц пористой среды, с увеличением коэффициента теплоотдачи, максимальные температуры фаз относительно возрастают, в то время как скорости волны, координаты максимальных температур и длина волны уменьшаются.
3. При каждом фиксированном значении коэффициента теплоотдачи из указанного диапазона максимальные температуры фаз, их координаты, скорости волны и толщина волны увеличиваются до максимального значения по мере увеличения диаметра частиц пористой среды до некоторого значения, называемым критическим диаметром, а затем уменьшается.
4. По мере увеличения скорости вдува ВВ-смеси в пористый блок огнепреградителя от 1 м/с до 2 м/с диапазон допустимых диаметров частиц расширяется при каждом фиксированном значении коэффициента теплоотдачи. Максимальные температуры фаз становятся относительно ниже, а скорости волны – относительно выше.

Поступило 02.07.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов. – Физика горения и взрыва, 1987, т. 23, №5, с.27-44.
2. Лаевский Ю.М., Бабкин.В.С. Фильтрационное горение газов. В сб. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд.,1988, с.108-145.
3. Добрего К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. – Минск.: Инс-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2002, 203 с.
4. Буркина Р.С. Фильтрационное горение газа в полуограниченной пористой среде. – Физика горения и взрыва, 2000, т. 36, №4, с.3-15.
5. Кабилов М.М., Халимов И.И., Шерматова З.Б. Влиянии толщины, теплопроводности пористого элемента, состава и скорости вдува смеси на пределы распространения волны фильтрационного горения метановоздушной смеси. – Доклады Национальной академии наук Таджикистана, 2024, т. 67, №9-10, с. 462-470.
6. Потытняков С.И., Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Влияние теплопотерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов. – Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, №1, с.19-26.
7. Алдушин А.П., Сеплярский Б.С. Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа. – Докл. АН СССР, 1978, т. 241, №1, с. 72-75.

8. Кабилов М.М., Халимов И.Х. Численное исследование стационарной структуры волны фильтрационного горения газов при наличии теплопотерь. –ДАН РТ, 2013, т.56, №4, с.297-304.
9. Кабилов М.М., Шерматова З.Б. Эквивалентная математическая модель фильтрационного горения газов при наличии теплопотерь. – Доклады Национальной Академии наук Республики Таджикистан, 2023, т. 66, №3-4, с.187-195.
10. Кабилов М.М. Шерматова З.Б., Садриддинов П.Б. Максимальные температуры газа, пористой среды и скорости стационарной волны фильтрационного горения водородо-воздушной смеси при наличии теплопотерь. – Челябинский физико-математический журнал, 2024, т. 9, вып. 2, с. 240-246.
11. Шерматова З.Б. Численное определение пределов распространения и структуры стационарной волны фильтрационного горения водородо-воздушной смеси при наличии теплопотерь. – Доклады Национальной академии наук Республики Таджикистан, 2025, т. 68, №3, с. 234-239.

М.М.Кабилов[*,], З.Б.Шерматова[**], П.Б.Садриддинов[*,***], Б.Ҷ.Гулбоев[**], Н.Н.Степанова[*]**

ТАЪСИРИ БАРОРИШИ ГАРМӢ АЗ СОҲАИ СӮЗИШ БА РЕЖИМҲОИ ПАСТ-ВА ЗИЁДА АЗ АДИАБАТИИ СӮЗИШИ ФИЛТРОНАИ ОМЕХТАИ ҲИДРОГЕНУ ҲАВО

[*]Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
[*]Институти математикаи ба номи А.Ҷӯраеви АМИ Тоҷикистон,
*[2**]Донишгоҳи (Славянии) Россияю Тоҷикистон,*
[***]Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Дар мақола ҳолатҳои ҳарорати сӯзиши филтронаи омехтаи гидрогену ҳаво аз ҳарорати сӯзиши адиабатӣ паст ва зиёд будан, таҳлил шудаанд. Таҳлил бо истифода аз маҷмӯи қимматҳои ҳарорати баландтарини муҳити ковок ва омехтаи гидрогену ҳаво, ки аз профилҳои ҳарорати фазаҳо гирифта шудаанд, анҷом дода шудааст. Мушоҳида шудааст, ки дар соҳаи тағирёбии параметрҳо, ки дар он профилҳои ҳароратии муҳити ковок ва омехтаи гидрогену ҳаво ба таври ҳисобӣ амалӣ мегарданд, режими зиёдаазадиабатӣ мушоҳида намешавад, яъне ҳарорати баландтарини муҳити ковок ҳамеша аз ҳарорати адиабатӣ пасттар аст. Ин натиҷа ҳангоми тағйир додани диаметри зарраҳои муҳити ковок ва коэффициенти бароришигармӣ ба муҳити атроф ба даст оварда шудааст. Ҳамчунин муайян карда шуд, ки барои ҳар як қиммати муайяни коэффициенти бароришигармӣ аз интервали мавриди назар, чунин диаметри зарраҳои муҳити ковок вуҷуд дорад, ки ҳангоми аз он зиёд шудан, ҳарорати баландтарини омехтаи газӣ аз ҳарорати адиабатӣ зиёд мешавад. Илова бар ин, дигар параметрҳои мавҷи сӯзиш дар ҳамвории параметрии мазкур низ таҳлил шудаанд, инчунин вобастагии онҳо аз суръати вуруди омехта ба блоки ковок баррасӣ гардидааст.

Калимаҳои калидӣ: *сӯзиш, омехтаи гидрогену ҳаво, таркиби омехта, суръати мавҷ, суръати ҳаводиҳии омехта, ҳарорати максималӣ, коэффисиенти бароришигармӣ, муҳити ковок, диаметри зарра, радиуси турбача.*

M.M.Kabilov[*,], Z.B.Shermatova[**], P.B.Sadriddinov[*,***], B.Dj.Gulboev[**], N.N.Stepanova[*]**

INFLUENCE OF HEAT REMOVAL FROM THE COMBUSTION ZONE ON SUB- AND SUPERADIABATIC REGIMES OF FILTRATION COMBUSTION OF A HYDROGEN–AIR MIXTURE

[*]National Academy of Sciences of Tajikistan,
[*]A.Juraev Institute of Mathematics, NAS of Tajikistan,
[**]Russian-Tajik (Slavic) University,
[***]Tajik National University

Annotation. Subadiabatic and superadiabatic regimes of filtration combustion of a hydrogen–air (HA) mixture have been analyzed. The analysis is based on sets of maximum temperature values of the porous medium and the HA mixture, obtained from calculated phase temperature profiles. It was found that in the range of parameters for which temperature profiles of the porous medium and the HA mixture are numerically realized, the superadiabatic regime is not observed; that is, the maximum temperature of the porous medium is always lower than the adiabatic temperature. This result was obtained by varying the particle diameter of the porous medium and the heat transfer coefficient to the surrounding space. It was also established that for each fixed value of the heat transfer coefficient within the considered range, there exists a certain particle diameter of the porous medium, above which the maximum temperature of the gas mixture exceeds the adiabatic value. In addition, other parameters of the combustion wave on this parametric plane were analyzed, as well as their dependence on the injection velocity of the mixture into the porous block.

Key words: *combustion; hydrogen–air mixture; mixture composition; wave velocity; mixture injection velocity; maximum temperature; heat transfer coefficient; porous medium; particle diameter; tube radius.*

Сведения об авторах:

3. **Кабилов Маруф Махмудович** – доктор физ.-мат. наук, Институт математики имени А.Джураева Национальной академии наук Таджикистана. E-mail: maruf1960@mail.ru;
4. **Шерматова Зайнаб Бахромовна** – Российско-Таджикский (Славянский) университет, преподаватель кафедры информатики и информационных технологий. E-mail: shermatova333@bk.ru;
5. **Садриддинов Парвиз Бахриддинович** – кандидат физико-математических наук, Таджикский национальный университет, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: parviz06@list.ru;
6. **Гулбоев Бахтиёр Джуракулович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Российско-Таджикский (Славянский) университет, заведующий кафедрой математики и физики. E-mail: bakhtiyor2012@mail.ru;
7. **Степанова Наталья Николаевна** – кандидат физико-математических наук, Институт математики имени А.Джураева Национальной академии наук Таджикистана.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №8

ФИЗИКА

УДК 534.16; 539.1.043
Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Член-корреспондент НАН Таджикистана Т.Х.Салихов,
Ю.П.Ходжаев, Ф.Дж.Камолиддинов, А.Махмалатиф

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДВУХСЛОЙНЫМИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ОБРАЗЦАМИ С УЧЕТОМ ВКЛАДА РЕЛАКСАЦИИ ПОТОКОВ ТЕПЛА

НИИ Таджикского национального университета

Исходя из системы нелинейных уравнений теплопроводности для четырёх слоев образца на прозрачной подложке в фотоакустической (ФА) камере предложена математическая модель исследования вклада релаксации потоков тепла во всех слоях в параметры возбуждаемых линейных и нелинейных ФА-сигналов. Температурные зависимости теплофизических и оптических параметров образца представлены посредством термических коэффициентов.

Ключевые слова: *фотоакустика, поток тепла, релаксация теплового потока, тепловая нелинейность, газомикрофонная регистрация.*

Известно [1-9], что фотоакустический (ФА) сигнал, регистрируемый микрофонным способом, состоит из линейной и нелинейной составляющих. Между тем, макроскопические потоки в конденсированных средах, в том числе и тепловые, являются релаксирующими величинами, которые явно проявляются в различных акустических и оптических экспериментах [10,11]. В этой связи в [12-14] нами была обобщена теория генерации ФА-сигнала для случая, когда поток тепла в исследуемом однослойном образце является релаксирующей величиной.

Целью настоящей работы является формулировка математической модели оценки вклада релаксации теплового потока на параметры нелинейного ФА-сигнала двухслойных образцов на прозрачной подложке.

Исходим из следующей системы нелинейных уравнений теплопроводности для всех слоев в ФА-камере:

$$\tau_g \frac{\partial}{\partial t}\left[C_g(T)\frac{\partial T_g}{\partial t} \right] + C_g(T)\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\kappa_g(T)\frac{\partial T_g}{\partial x} \right],\ 0 \le x \le l_g \quad . \tag{1}$$

$$\tau_{s1} \frac{\partial}{\partial t}\left[C_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial t} \right] + C_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\kappa_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x} \right] + S_1(x,t) \quad , \quad -l_1 \le x \le 0 \tag{2}$$

Адрес для корреспонденции: *Салихов Тагаймурод Хаитович, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17, Таджикский национальный университет. E-mail: tsalikhov@mail.ru.*

$$\tau_{s2}\frac{\partial}{\partial t}\left[C_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial t}\right]+C_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\kappa_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial x}\right]+S_2(x,t),\ -(l_1+l_2)\le x\le -l_1, \tag{3}$$

$$\tau_b\frac{\partial}{\partial t}\left[C_b(T)\frac{\partial T_b}{\partial t}\right]+C_b(T)\frac{\partial T_b}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\kappa_b(T)\frac{\partial T_b}{\partial x}\right],\ -(l_1+l_2+l_b)\le x\le -(l_1+l_2)\ , \tag{4}$$

где C_{pi}, κ_{pi}, A_i, β_i – теплоемкости единицы объема, коэффициент теплопроводности, поглощательная способность и оптический коэффициент поглощения соответствующих слоев соответственно, $S_1(x,t)=0.5\beta_1 I_0 e^{\beta_{1i}x}[1+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}]A_{s1}(1+e^{i\omega t}),\ S_2(x,t)=0.5\beta_2 I_0 e^{-\beta_1^{(0)}l_1}e^{\beta_1(x+l_1)}[1+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}](1-R_{s1})A_{s2}(1+e^{i\omega t}).$

В этом случае граничные условия – условия непрерывности температур и потоков тепла на границах газовый слой- первый слой образца, первый слой образца-второй слой образца и второй слой образца-подложка, а также условие отсутствия нагрева на торцах ФА –камеры, имеют вид

$$\kappa_g(T)\frac{\partial T_g}{\partial x}\bigg|_{x=0}+\tau_g\frac{\partial}{\partial t}\left(\kappa_g(T)\frac{\partial T_g}{\partial x}\right)\bigg|_{x=0}=\kappa_{1s}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x}\bigg|_{x=0}+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}\left(\kappa_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x}\right)\bigg|_{x=0},\ T_g(0,t)=T_{S1}(0,t),$$

$$T_{S1}(-l_1,t)=T_{S2}(-l_1,t),\ T_{S2}(-l_1-l_2,t)=T_b(-l_1-l_2,t),\ T_g(l_g,t)=0,\ T_b(-l_1-l_2-l_b,t)=0,$$

$$\kappa_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x}\bigg|_{x=-l_1}+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}(\kappa_{s1}(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x}\bigg|_{x=-l_1}=\kappa_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial x}\bigg|_{x=-l_1}+\tau_{s2}\frac{\partial}{\partial t}(\kappa_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial x}\bigg|_{x=-l_1},$$

$$\kappa_b(T)\frac{\partial T_b}{\partial x}\bigg|_{x=-(l_1+l_2)}+\tau_b\frac{\partial}{\partial t}(\kappa_b(T)\frac{\partial T_{s1}}{\partial x}\bigg|_{x=-(l_1+l_2)}=\kappa_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial x}\bigg|_{x=-(l_1+l_2)}+\tau_{s2}\frac{\partial}{\partial t}(\kappa_{s2}(T)\frac{\partial T_{s2}}{\partial x}\bigg|_{x=-(l_1+l_2)}.$$

Температурную зависимость величин $C_{pi}(T)$, $\kappa_i(T)$, $\mathrm{A}_S(T)$ представим в виде

$$C_{pi}[T(t,x)]=C_{pi}^{(0)}[1+\delta_i T_i'(t,x)],\ \kappa_i[T(t,x)]=\kappa_i^{(0)}[1+\delta_i T_i'(t,x)],\ \mathrm{A}_S[T(t,x)]=\mathrm{A}_S^{(0)}[1+\delta_i T_i'(t,x)],$$

где $C_{pi}^{(0)}=C_{pi}(T_0)$, $\kappa_i^{(0)}=\kappa(T_0)$, $\mathrm{A}^{(0)}=A(T_0)$- начальные значения, а $\delta_i=(1/C_{pi}^{(0)})(\partial C_{pi}/\partial T)$, $\delta_{2i}=(1/\kappa_{2i}^{(0)})(\partial\kappa_i/\partial T)$, $\delta_3=(1/A^{(0)})(\partial A/\partial T)$ – термические коэффициенты этих параметров.

Приращение температурного поля во всех слоях представим в виде $T_i(t,x)=T_{0i}(x)+\Phi_i(t,x)$, где $T_{0i}(x)$ – установившееся поле температуры, $\Phi_i(t,x)$ – ее колебательная часть. Очевидно, что величина $\Phi_i(t,x)$ состоит из суммы линейных $\Phi_{Li}(x,t)$ и нелинейных $\Phi_{Ni}(x,t)$ частей $\Phi_i(x,t)=\Phi_{Li}(x,t)+\Phi_{1Ni}(x,t)+\Phi_{2Ni}(x,t)$, где $\Phi_{1N}(t,x)$ и $\Phi_{2N}(t,x)$- эти же колебания на соответствующих гармониках.

Для получения аналитических выражений для величин $\Phi_{1N}(t,x)$ и $\Phi_{2N}(t,x)$ необходимо иметь соответствующие дифференциальные уравнения и граничные условия для них. Учитывая условие $\left|\Phi_{N_i}(t,x)\right|<<\left|\Phi_{L_i}(t,x)\right|$, пренебрегаем слагаемыми высших порядков малости и получаем следующую

систему дифференциальных уравнений для первых двух гармоник нелинейного акустического колебания температуры для всех слоев ФА – камеры:

$$C_g\left[\frac{\partial\Phi_{Lg}}{\partial t}+\tau_g\frac{\partial^2\Phi_{Lg}}{\partial t^2}\right]=\kappa_g\frac{\partial^2\Phi_{Lg}}{\partial x^2}, \tag{5}$$

$$C_{S1}\left[\frac{\partial\Phi_{LS1}}{\partial t}+\tau_{s1}\frac{\partial^2\Phi_{LS1}}{\partial t^2}\right]=\kappa_{S1}\frac{\partial^2\Phi_{LS1}}{\partial x^2}+S_1(x,t)+\tau_{s1}\frac{\partial S_1}{\partial t}, \tag{6}$$

$$C_{S2}\left[\frac{\partial\Phi_{LS2}}{\partial t}+\tau_{s2}\frac{\partial^2\Phi_{LS2}}{\partial t^2}\right]=\kappa_{S2}\frac{\partial^2\Phi_{LS2}}{\partial x^2}+S_2(x,t)+\tau_{s2}\frac{\partial S_2}{\partial t}, \tag{7}$$

$$C_b[\frac{\partial\Phi_{Lb}}{\partial t}+\tau_b\frac{\partial^2\Phi_{Lb}}{\partial t^2}]=\kappa_b\frac{\partial^2\Phi_{Lb}}{\partial x^2}, \tag{8}$$

$$\frac{\partial^2\Phi_{1Ng}(x,t)}{\partial x^2}-\frac{1}{\chi_{\mathrm{g}}^{(0)}}\frac{\partial\Phi_{1Ng}(x,t)}{\partial t}=-(\delta_{2g}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-\frac{\delta_g}{\chi_g^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t})[T_{0g}(x)\Phi_{Lg}(t,x)], \tag{9}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2\Phi_{1NS1}(x,t)}{\partial x^2}-\frac{1}{\chi_{1S1}^{(0)}}\left[\frac{\partial\Phi_{1NS1}(x,t)}{\partial t}+\tau_{S1}\frac{\partial^2\Phi_{1NS1}(x,t)}{\partial t^2}\right]=\\&=-\{\delta_{2s1}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-\frac{\delta_{s1}}{\chi_{s1}^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\left[1+\tau_{S1}\frac{\partial}{\partial t}\right](T_{0S1}(x)\Phi_{LS1}(x,t)\}-,\\&-\frac{I_0A_{S1}^{(0)}\beta_1e^{\beta_1x}}{2k_{S1}^{(0)}}\times\delta_3\left(1+\tau_{S1}\frac{\partial}{\partial t}\right)[e^{i\omega t}\Theta_0+\Phi_{LS1}(0,t)]\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2\Phi_{1NS2}(x,t)}{\partial x^2}-\frac{1}{\chi_{1S2}^{(0)}}\left[\frac{\partial\Phi_{1NS2}(x,t)}{\partial t}+\tau_{S2}\frac{\partial^2\Phi_{1NS2}(x,t)}{\partial t^2}\right]=\\&=-\{\delta_{2s2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-\frac{\delta_{s2}}{\chi_{s2}^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\left[1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right](T_{0S2}(x)\Phi_{LS2}(x,t)\}-\ ,\\&-\frac{I_0A_{S2}^{(0)}\beta_2e^{\beta_2x}}{2k_{S2}^{(0)}}\times\delta_3\left(1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right)[e^{i\omega t}\Theta_0+\Phi_{LS2}(0,t)]\end{aligned} \tag{11}$$

$$\frac{\partial^2\Phi_{1Nb}(x,t)}{\partial x^2}-\frac{1}{\chi_b^{(0)}}\frac{\partial\Phi_{1Nb}(x,t)}{\partial t}=-\left(\delta_{2b}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-\frac{\delta_b}{\chi_b^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\right)[T_{0b}(x)\Phi_{Lb}(t,x)]. \tag{12}$$

$$\frac{\partial^2\Phi_{2Ng}(x,t)}{\partial x^2}-\frac{1}{\chi_g^{(0)}}\frac{\partial\Phi_{2Ng}(x,t)}{\partial t}=-\frac{1}{2}\left(\delta_{2g}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-\frac{\delta_g}{\chi_g^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\right)[\Phi_{Lg}^2(t,x)], \tag{13}$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2NS1}(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi_{1S1}^{(0)}}\left(1+\tau_{S1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Phi_{2NS1}(x,t)}{\partial t} -$$
$$-0.5\left[\delta_{2S1}\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_{S2}}{\chi_{1S(1)}^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\left(1+\tau_{S1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\right]\Phi_{\mathrm{LS1}}^2(x,t)) - , \qquad (14)$$
$$-\frac{I_0 A_{S1}^{(0)}\beta_1 e^{\beta_1 x}}{2k_{S1}^{(0)}} \times \delta_3\left(1+\tau_{S1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\Phi_{LS1}(0,t)\exp[i\omega t]$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2NS2}(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi_{1S2}^{(0)}}\left(1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Phi_{2NS2}(x,t)}{\partial t} -$$
$$-0.5\left[\delta_{2S2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_{S2}}{\chi_{1S(2)}^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t}\left(1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right)\right]\Phi_{\mathrm{LS2}}^2(x,t)) - , \qquad (15)$$
$$-\frac{I_0 A_{S2}^{(0)}\beta_2 e^{\beta_2 x}}{2k_{S2}^{(0)}} \times \delta_3\left(1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right)\Phi_{LS2}(0,t)\exp[i\omega t]$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2Nb}(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi_b^{(0)}}\frac{\partial \Phi_{2Nb}(x,t)}{\partial t} = -\frac{1}{2}(\delta_{2b}\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\delta_b}{\chi_b^{(0)}}\frac{\partial}{\partial t})[\Phi_{Lb}^2(t,x)], \qquad (16)$$

где $\Theta_0 = T_{0s}(0)$.

Граничные условия для этих величин можно написать в виде

$$\Phi_{1Ns(1)}(t,0) = \Phi_{1Ng}(t,0),\ \Phi_{1Ns1}(t,-l_1) = \Phi_{1Ns2}(t,-l_1),\ \Phi_{1Nb}(t,-l_1-l_2-l_b) = \Phi_{1Ng}(t,l_g) = 0 \qquad (17)$$

$$\Phi_{2Nb}(t,-l_1-l_2-l_b) = \Phi_{2Ng}(t,l_g) = 0,\ \Phi_{2Ns(1)}(t,0) = \Phi_{2Ng}(t,0),\ \Phi_{2Nb}(t,-l_1-l_2) = \Phi_{2Ns2}(t,-l_1-l_2), \qquad (18)$$

$$\left\{\frac{\partial \Psi_{1g}(t,x)}{\partial x}\right\}\Big|_{x=0} = \frac{\kappa_{s1}^{(0)}}{\kappa_g^{(0)}}\left(1+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Psi_{1s1}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=0},$$
$$\frac{\partial \Psi_{1b}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=-(l_{S(1)})} = \frac{\kappa_{s2}^{(0)}}{\kappa_b^{(0)}}\left(1+\tau_{s2}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Psi_{1s2}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=-(l_{S(1)}}, \qquad (19)$$

$$\left\{\frac{\partial \Psi_{2g}(t,x)}{\partial x}\right\}\Big|_{x=0} = \frac{\kappa_{s1}^{(0)}}{\kappa_g^{(0)}}\left(1+\tau_{s1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Psi_{2s1}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=0},$$
$$\frac{\partial \Psi_{2b}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=-l_1-l_2} = \frac{\kappa_{s(2)}^{(0)}}{\kappa_b^{(0)}}\left(1+\tau_{S2}\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial \Psi_{2s2}(t,x)}{\partial x}\Big|_{x=-l_{S(}}, \qquad (20)$$

где $\Psi_{1i}(t,x) = \Phi_{1Ni}(t,x) + \delta_{2i}T_{0i}(x)\Phi_{Li}(t,x)$, $\Psi_{2i}(t,x) = \Phi_{2Ni}(t,x) + 0{,}5\delta_{2i}\Phi_{Li}^2(t,x)$.

Система уравнений (5)-(16) совместно с граничными условиями (17)-(20) представляет собой математическую модель сформулированной задачи. Это позволит количественно определить вклад релаксации потока тепла в формирование нелинейного ФА – отклика. Решению этих задач будут посвящены следующие работы авторов.

Поступило 18.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Rosencwaig A., Gersho A. Theory of the photoacoustic effect with solids. – J.Appl Phys., 1976, vol. 47, №.1, pp.64-69.
2. Fujji Y., Moritani A., Nakai J. Photoacoustic Spectroscopy Theory for Multi-Layered Samples and Interference Effect. – Jpn. J. Appl. Phys., 1981, vol. 20, №2, pp. 361-367.
3. Masahiko M. Theory and Experiments on the Photoacoustic Effect in Double-Layer Solid – Jpn. J. of Applied Physics, 1981, vol. 20, №5, pp. 835−842.
4. Barros, M. Faria R.M. Photoacoustic procedure for measuring thermal parameters of transparent solids. – Appl. Phys. Lett., 1995 vol. 67, №2, pp.3892-3894.
5. Салихов Т.Х., Меликхуджа Н., Махмалатиф А. Генерация фотоакустического сигнала двухслойными прозрачными образцами с поглощающей подложкой. – Письма в журнал технической физики, 2019, т.45, №9, с.30-31.
6. Егерев, С.В. Симановский Я.О. Оптоакустика неоднородных медицинских сред: конкуренция механизмов и перспективы применения. – Акустический журнал, 2022, т.68, №1, с.96-116.
7. Gao, R. Xu Z., Ren Y., Song L., Liu C. Nonlinear mechanism in photoacousticc – powerful tools in photoacoustic imaging – Photoacoustics, 2021, vol. 22, pp.100-243.
8. Проскурин М.А., Хабибулин В.Р., Усольцева Л.О., Вырко Е.А., Михеев И.В., Волков Д.С. Фототермическая и оптоакустическая спектроскопия: Современное состояние и преспективы. – Успехи физических наук, 2022, т.192, №3, с.294-340.
9. Салихов Т.Х., Мадвалиев У., Шарифов Д.М., Туйчиев Х.Ш. К теории генерации нелинейного фотоакустического сигнала при газомикрофонной регистрации. – Журнал технической физики, 2021, т.91, вып. 11, с.1608-1618.
10. Аржаков М.С. Релаксационные явления в полимерах. – М.: Accent Graphics communications, 2018, с.155.
11. Kaminski, K. Hyperbolic Heat Conduction Equation for Materials With a №nhomogeneous Inner Structure. – Journal of Heat Transfer, 1990, vol. 112, pp. 555-559.
12. Салихов Т.Х., Ходжаев Ю.П., Сулаймонов А.Э. О вкладе релаксации потока тепла в характеристики фотоакустического сигнала твердотельных образцов. – Вестник ТНУ. Серия Естественных наук, 2023, № 1, с.149-159.
13. Т.Х.Салихов, Ю.П.Ходжаев, А.Э.Сулаймонов. Особенности генерации второй гармоники нелинейного фотоакустического сигнала в конденсированных средах с релаксацией потока тепла. – Вестник ТНУ. Серия Естественных наук, 2023, № 2, с.158-168.
14. Ходжаев Ю.П., Салихов Т.Х., Сулаймонов А.Э., Махмалатиф А. Вклад релаксации потока тепла на характеристики основной гармоники нелинейного фотоакустического сигнала в конденсированных средах. – Вестник ТНУ. Серия Естественных наук, 2024, № 1, с.62-75.

Т.Ҳ.Салихов, Ю.П.Хоҷаев, Ф.Ҷ.Камолиддинов, А.Маҳмалатиф

АМСИЛАИ РИЁЗИИ ТАВЛИДИ СИГНАЛИ ҒАЙРИХАТТИИ ФОТОАКУСТИКИ ДАР НАМУНАҲОИ ДУҚАБАТАИ САХТ БО НАЗАРДОШТИ РЕЛАКСАТСИЯИ СЕЛҲОИ ГАРМӢ

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Дар асоси системаи муодилаҳои ғайрихаттии гармигузаронӣ барои ҳамаи чаҳор қабати намуна дар таҳқурсии шаффоф дар камераи фотоакустики (ФА) амсилаи риёзии омӯзиши саҳми релаксатсияи сели гармо дар ҳама қабатҳо ба параметрҳои сигналҳои хатӣ ва ғайрихаттии ФА пешниҳод карда шудааст. Вобастагиҳои ҳароратии параметрҳои гармофизикӣ ва оптикӣ бо ёрии зарибҳои термикӣ ифода карда шудаанд.

Калимаҳои калидӣ: *релаксатсияи сели гармӣ, ғайрихаттияти ҳароратӣ, фотоакустика, пажвоки ғайрихаттии фотоакустикӣ, қайдгирии газомикрофонӣ.*

T.Kh.Salikhov, U.P.Khodjaev, F.Dj.Kamoliddinov, A.Mahmalatif

MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIPTION OF THE CONTRIBUTION OF HEAT FLOW RELAXATION TO THE NONLINEAR PHOTOACOUSTIC RESPONSE OF TWO-LAYER SOLID SAMPLES.

Tajik national university

Based on the system of nonlinear heat conductivity equations for all four layers in a photoacoustic (PA) camera with a transparent substrate, a mathematical model is proposed to study the contribution of relaxation of heat flows in all layers to the parameters of excited linear and nonlinear PA signals. The temperature dependence of the thermophysical and optical parameters is presented by means of thermal coefficients.

Key words: *photoacoustics, absorbing substrate, heat flow, heat flow relaxation, thermal nonlinearity, gas-microphone registration.*

Сведения об авторах:

1. **Салихов Тагаймурод Хаитович** – д.ф.-м.н., профессор, ГНС НИИ ТНУ. E-mail: tsalikhov@mail.ru;
2. **Ходжаев Юнус Пардалиевич** – к.ф.-м.н., ВНС НИИ ТНУ. E-mail: kh.yunus84@mail.ru;
3. **Камолиддинов Фариддун Джалолиддинович** – ТНУ, старший преподаватель кафедры ядерной физики физического факультета. E-mail: kamf-tnu@yandex.ru;
4. **Алишери Махмалатиф** − к.ф.-м.н., НИИ ТНУ, старший научный сотрудник. E-mail: alisher−11.90@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №8

ФИЗИКА

УДК 541.64:539.2
Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Д.Рашидов, С.Табаров, Ш.П.Исматов, Ф.Содиков, Ш.И.Акназарова, А.Дустов

СТРУКТУРА И СВЕТОСТОЙКОСТЬ ГРАФЕННАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Таджикский национальный университет

(Представлено членом-корреспондентом НАН Таджикистана Т.Х.Салиховым 29.05.2025 г.)

Проведено исследование влияния малослойных графенов (МГ) различного происхождения на структуру и светостойкость полиэтилена низкой плотности. Показано, что с увеличением концентрации МГ заметных изменений угловых положений 2θ, радиальной полуширины Δ2θ и интенсивностей рефлексов на дифрактограмме наполненного ПЭНП (по сравнению с исходным) не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии появления новых кристаллических образований в полимерной матрице.

Показано, что светостойкость композитов, наполненных крахмальным, кедровым и сосновым МГ с ростом времени предварительного облучения увеличивается в два раза (в случае МГ из крахмала), а для двух последних (кедровый и сосновый МГ) не превышает однократный. Предложен механизм стабилизирующего и структурирующего действия крахмального, кедрового и соснового МГ на ПЭНП.

Ключевые слова: *полимер, малослойный графен, композит, структура, светостойкость.*

Известно, что полимерные материалы или изделия из них, находящиеся на открытых площадках хранения или эксплуатации, под воздействием внешних факторов (температура, влага, УФ-излучение и пр.) со временем претерпевают различного рода преобразования, приводящие в итоге к существенной потере их исходных эксплуатационных характеристик. Из упомянутых факторов наиболее существенное воздействие на полимеры оказывает УФ-излучение [1], под действием которого в атмосферных условиях протекают различного рода фотоокислительные процессы, а в ряде случаев процессы частичной сшивки [2].

До настоящего времени известно два основных способа защиты полимеров от УФ-излучения [3]: поверхностное экранирование и светостабилизация органическими и неорганическими пигментами. Механизм действия светостабилизаторов сложен и до конца строго не определен. С другой стороны, большинство светостабилизаторов являются продуктами сложного органического синтеза и небезопасны при попадании в окружающую среду из полимерных материалов под действием внешних факторов [4-7].

В последнее время в качестве светостабилизаторов полимерных систем довольно активно используются 2Д- графеновые структуры (малослойные графены), получаемые карбонизацией таких биопрекурсоров, как глюкоза, крахмал, целлюлоза, лигнин, кора кедра, сосны и др. Выбор

Адрес для корреспонденции: *Джалил Рашидов. 734055, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. Таджикский национальный университет. E-mail: rashidov.43@mail.ru.*

малослойных графенов в качестве светостабилизаторов основан на свойствах сопряженных ароматических соединений эффективно абсорбировать УФ-излучение [8, 9].

В работе проведено комплексное исследование влияния малослойных графенов различного происхождения на светостойкость широко применяемого на практике полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с использованием методов рентгенографии, теплофизики и механических испытаний.

Исследовали ПЭНП марки 15303-00 с $M=6\cdot10^4$. Наполнителями служили смеси крахмала, коры кедра и сосны, полученные методом самого распространяющегося высокотемпературного синтеза. Пленки композитов отливали из смешанных растворов полимера и наполнителя в бромбензоле при 80°С. Толщина пленок составляла 60-80 мкм.

Образцы для механических испытаний вырезали в форме двойной лопатки (25 мм длиной и 3,5 мм шириной). Их предварительно облучали УФ-светом (λ=254 нм) от лампы БУВ-30 в атмосферных условиях. Светостойкость образцов оценивали по изменению отношения разрывной прочности облученных образов σ_t к разрывной прочности исходного образца σ_0 в зависимости от времени предварительного облучения.

Для полноты картины наблюдаемых изменений важно иметь представление о структурных особенностях исходных компонентов по отдельности и в композитном состоянии. На рисунке 1 изображена типичная рентгенограмма большеуглового рассеяния (БР) частиц кедрового малослойного графена (МГ). На рентгенограмме видно, что присутствует только одно широкое аморфное гало с максимумом при угле 2θ = 21–22°. Это говорит о том, что МГ не образует стабильные многослойные (трёхмерные) структуры, а находится в аморфном монослойном состоянии [11–12]. Аналогичные рентгенограммы наблюдаются для крахмального и соснового МГ.

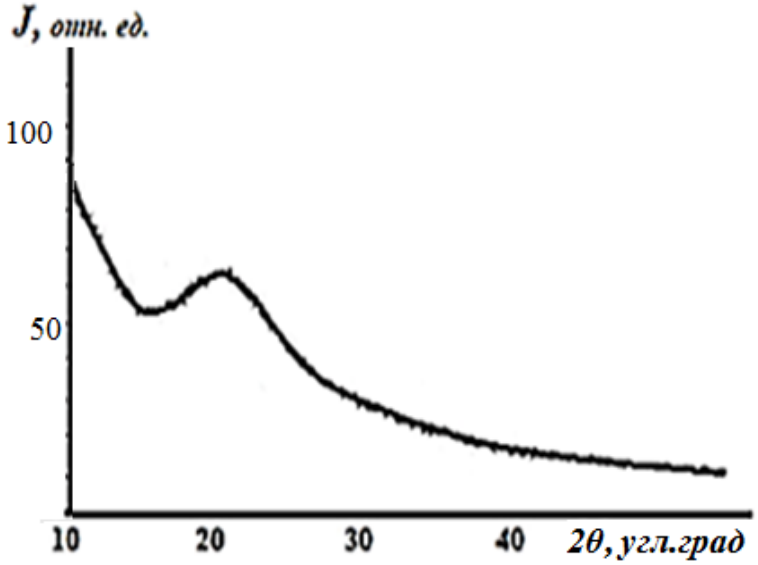


Рис. 1. Большеугловая рентгенограмма порошка кедрового графена.

В диапазоне концентраций добавок от 1% до 5% на БР для образцов композитов ПЭНП-кедровый графен, подвергнутых УФ-облучению (рис. 2), не происходит заметных изменений в угловых положениях 2θ, радиальной полуширине Δ2θ и интенсивности I_c рефлексов, характерных для полиэтилена. Это говорит об отсутствии новых кристаллических образований в полимерной матрице. Размеры кристаллических образований составляют около 5-6 нм.

Аналогичные результаты получены для образцов ПЭНП-крахмальный графен и сосновый графен.

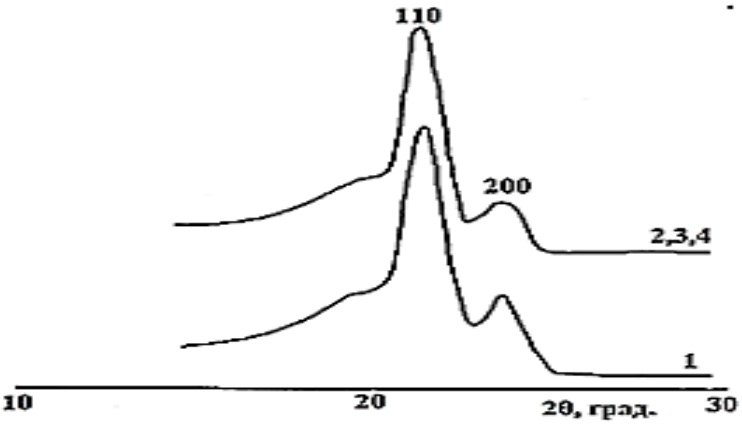


Рис. 2. Большеугловая рентгенограмма композитов ПЭНП-5% кедр. с различными временами предварительного УФ-облучения: 1 – 0; 2 – 50; 3 – 150; 4 – 250 час.

В предыдущих исследованиях композитов на основе полиэтилена и фуллерена C_{60} [13, 14] было установлено, что частицы графена, полученные из крахмала, коры кедра и сосны, не встраиваются в кристаллическую решётку полиэтилена. Они располагаются в аморфных областях между кристаллитами и сферолитами полимера. Это может как ухудшить, так и улучшить эксплуатационные характеристики материала [15]. Термографические исследования показали, что для всех композитов с содержанием С от 1 до 5% как для исходных, так и для образцов, подвергнутых ультрафиолетовому облучению, температуры плавления и кристаллизации остаются постоянными и составляют 107°С и 97°С соответственно. Это свидетельствует о высокой стабильности образующихся кристаллических структур.

Модификация полимеров наноуглеродными наполнителями часто используется как приём реализации эффекта усиления и, в частности, для улучшения их прочностных параметров [15, 16]. Однако, как показали опыты, с ростом времени предварительного УФ-облучения для всех трёх видов композитов наблюдается рост величины прочности на разрыв при одноосном растяжении, т.е имеет место светостабилизация полимера. На практике количественно светостабилизирующее действие наполнителя определяют через величину светостойкости полимера, определяемую как отношение разрывной прочности образца, облученного в течении определённого времени, σ_t, к разрывной прочности исходного полимера σ_o, то есть по величине отношения σ_t/σ_o. При этом, чем больше единицы значение отношения $\sigma_t/\ \sigma_o$, тем эффективней введенный светостабилизатор.

На рисунке 3 представлены графики, демонстрирующие изменение светостойкости композитов (σ_t/σ_0) ПЭНП-крахмальный графен (а), ПЭНП-кедровый графен (б) и ПЭНП-сосновый графен (в) в зависимости от времени предварительного УФ-облучения. Для чистого ПЭНП с увеличением времени предварительного облучения наблюдается монотонное снижение светостойкости, достигающее 30% от исходного значения (рис. 3а, кривая 1). В то же время для композитов ПЭНП-крахмальный графен (рис. 3а, кривые 2, 3, 4) наблюдается практически противоположная зависимость — рост светостойкости, достигающий 100%. Для композитов ПЭНП-кедровый графен (рис. 3б, кривые 2 и 3) и ПЭНП-сосновый графен (рис. 3в, кривые 3 и 4) наблюдается практически неизменная светостойкость при малых содержаниях графена (1 и 3%) и её небольшой рост (около 30%) при 5 и 10% наполнении. Таким

образом, в зависимости от типа графена можно наблюдать как стабилизирующее, так и деструктирующее действие наполнителя.

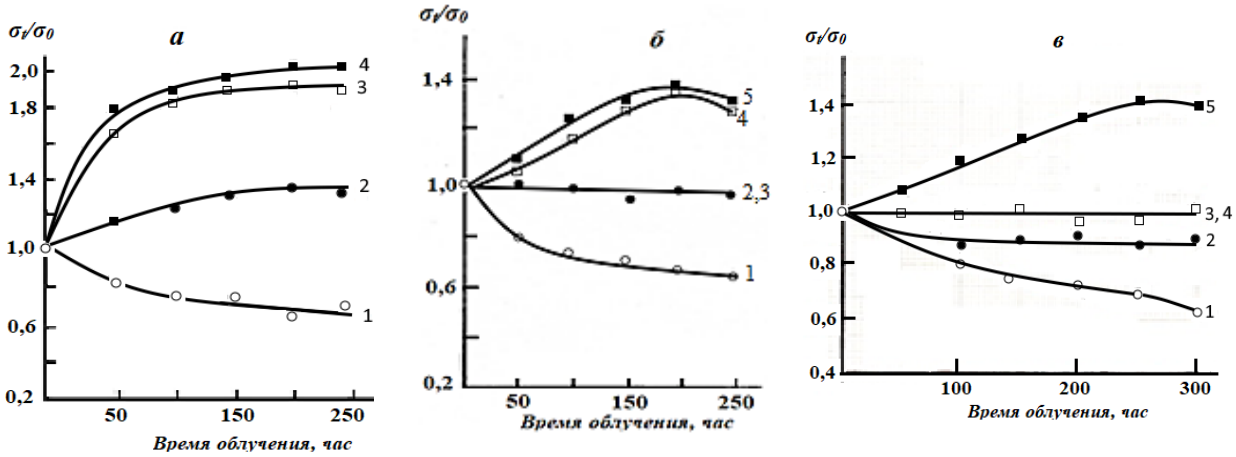


Рис. 3. Зависимость светостойкости композитов ПЭНП-крахмальный графен (*а*), ПЭНП-кедровый графен (*б*) и ПЭНП-сосновый графен (*в*) от времени предварительного УФ-облучения для наполнений: 1 – С= 0; 2 – 1; 3 – 3; 4 – 5; 5 – 10%.

Вероятно, что способность графеноксидов стабилизировать полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) обусловлена классическим механизмом стабилизации. Он включает в себя прямое поглощение квантов падающего света частицами наполнителя и/или передачу энергии возбуждения от молекул полимера к наполнителю с последующим рассеиванием энергии в виде тепла. Рост же светостойкости композитов, наиболее вероятно, связан с межмолекулярной фотосшивкой полимерной матрицы посредством частиц наполнителя.

Работа выполнена в рамках проекта №0124TJ1575 от 30.01.2024г. и плана научно-исследовательских работ ТНУ.

Поступило 29.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Wypych G. (ed.). Handbook of UV degradation and stabilization. – Elsevier, 2020.
2. Feldman D. Polymer Weathering: Photo-Oxidation. – Journal of Polymers and the Environment, 2002, №10, pp. 163-173. DOI:10.1023/A:1021148205366.
3. Grassie N., Scott G. Polymer degradation and stabilization. – Cambridge University Press, 1985, 236 p.
4. Marturano Valentina, Cerruti Pierfrancesco and Ambrogi Veronica. "Polymer additives" – Physical Sciences Reviews, 2017, vol.2, №6, pp.20160130. https://doi.org/10.1515/psr-2016-0130.
5. Katherine H. Langford, Malcolm J. Reid, Eirik Fjeld, Sigurd Øxnevad, Kevin V. Thomas, Environmental occurrence and risk of organic UV filters and stabilizers in multiple matrices in Norway. – Environment International, 2015, №80, pp.1-7. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.012
6. Al-Malaika, S. Photostabilizers. In: Karger-Kocsis, J. (eds) Polypropylene. – Polymer Science and Technology Series, (1999), vol.2. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4421-6_79.

7. Li Xiong, Zhaojie, Li Farooq, Shah, Peng, Wang, Qianhua, Yuan, Weilong, Wu. (2024). Biodegradable mulch film enhances the environmental sustainability compared with traditional polyethylene film from multidimensional perspectives. – Chemical Engineering Journal, 2024. DOI: 10.1016/j.cej. 152219.
8. Rahulreddy Chennareddy, Hesham Tuwair, Usama F. Kandil, Mohamed ElGawady, M.M. Reda Taha, UV-resistant GFRP composite using carbon nanotubes. – Construction and Building Materials, Volume 220, 2019, pp.679-689. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.167
9. Tang Y., Gao, P., Wang, M., Zhu, J., Wan X.A. Novel Glycopolymeric Ultraviolet Absorber Covering UV-A and UV-B Ranges. – RSC Adv.2014, №4, 22617−22620.
10. Мержанов А.Г., Мукасьян А.С. Твердопламенное горение. – М.: Черноголовка, 2000, 336 с.
11. Содиков Ф., Рашидов Д., Табаров С.Х., Исматов Ш.П., Дустов А., Акназарова Ш.И. Влияние температуры отжига на структуру и тепловые свойства графеноксидсодержащего полиэтилена. – Вестник ТНУ, №3, 2024, с.77-87.
12. Туйчиев Ш., Рашидов Д., Табаров С.Х., Акназарова Ш.И., Туйчиев Л., Дустов А., Содиков Ф. О влияние нанографеноксидов на структуру и свойства кристаллических полимеров. – Вестник ТНУ, №2, 2029, с.134-138.
13. Б.М.Гинзбург, Ш.Туйчиев, Д.Рашидов, С. Х.Табаров, Т.Е.Суханова, М.Э.Вылегжанина, А.А.Кутин, В.Л. Уголков Влияние фуллерена C_{60} на структуру и механические свойства полиэтилена: Технологический аспект. – Высокомолекулярные соединения. Серия А, Т.53, №6, 2011, с.883-896.
14. Б.М.Гинзбург, Ш.Туйчиев, Д. Рашидов, С. Х. Табаров Влияние фуллерена С60 на структуру и механические свойства тонких пленок из полиметилметакрилата и других карбоцепных полимеров винилового ряда: Технологический аспект. – Высокомолек. соедин. Серия А, Т.54, №8, 2012, с.1283-1296.
15. Voznyakovskii A., Neverovskay A., Vozniakovskii A., Kidalov S. A Quantitative Chemical Method for Determining the Surface Concentration of Stone-Wales Defects for 1D and 2D Carbon Nanomaterials. – Nanomaterials 2022, vol.12, pp.883. https://doi.org/10.3390/nano12050883
16. Srivastava S. K., Mishra Y. K. Nanocarbon reinforced rubber nanocomposites: detailed insights about mechanical, dynamical mechanical properties, payne, and mullin effects. – Nanomaterials, 2018, т.8, №11, с. 945.

Д.Рашидов, С.Табаров, Ш.П.Исматов, Ф.Содиқов, Ш.И.Ақназарова, А.И.Дустов

СОХТОР ВА РУШНОИТОБОВАРИИ ПОЛИЭТИЛЕНИ БО ГРАФЕН ПУРКАРДАШУДА

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Таҳқиқи таъсири графенҳои камқабатаи пайдоишашон гуногун ба сохтор ва рушноитобоварии полиэтилении зичиаш паст гузаронида шудааст. Нишон дода шудааст, ки бо зиёд шудани консентратсияи графенҳо тағйироти назарраси мавқеъҳои кунҷи 2θ, нимвасеъгии радиалӣ Δ2θ ва интенсивияти инъикос дар дифрактограммаҳои намунаҳои бо графенҳо пуршудаи ПЭЗП (нисбат ба асл) ба мушоҳида намерасад, ки аз устуворияти баланди сохтори кристаллии полимер шаҳодат медиҳад.

Муқаррар карда шудааст, ки рӯшнотобоварии композитҳои бо графентҳои крахмалӣ пуршуда бо зиёд шудани вакти нурборонкунии ултрабунафш ду баробар зиёд мешавад, дар сурати

пуркунандаҳои кедрӣ ва санавбарӣ бошад он на зиёд аз яккарата аст. Механизми таъсироти истиқрор-кунандагӣ ва сохторсозии графенҳои камқабат ба полиэтилени зичиаш паст пешниҳод карда шудааст.
Калимаҳои калидӣ: *полимер, графени камқабата, композитсия, сохтор, рушноиустуворӣ.*

D.Rashidov, S.Tabarov, Sh.P.Ismatov, F.Sodikov, Sh.I.Akhnazarova, A.I.Dustov

STRUCTURE AND LIGHT RESISTANCE OF GRAPHENE OXIDE FILLED POLYETHYLENE

Tajik National University

The effect of few-layer graphenes (MG) of various origins on the structure and light resistance of low-density polyethylene was studied. It was shown that with an increase in the MG concentration, no noticeable changes in the angular positions 2θ, radial half-width Δ2θ and the intensity of reflections in the diffraction pattern of filled LDPE (compared to the original) are observed, which indicates the absence of new crystalline formations in the polymer matrix.

It was shown that the light resistance of composites filled with starch, cedar and pine MG increases twofold with an increase in the pre-irradiation time (in the case of MG from starch), and for the latter two (cedar and pine MG) it does not exceed one-fold. A mechanism for the stabilizing and structuring effect of starch, cedar and pine MG on LDPE is proposed.
Key words: *polymer, few-layer graphene, composite, structure, lightfastness.*

Сведения об авторах:

1. **Рашидов Джалил** – д. ф.-м. н., профессор, Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, главный научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред. E-mail: rashidov.43@mail.ru;
2. **Табаров Саади Холович** – к. ф.-м. н., доцент, Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, ведущий научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред. E-mail: s.tabarov@mail.ru;
3. **Исматов Шабоз Партовович** – Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, ассистент лаборатории физики конденсированных сред. E-mail: shismatov96@mail.ru;
4. **Содиков Фирузджон Ходиходжаевич** – к. ф.-м. н., Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, зав. лабораторией физики конденсированных сред. E-mail: firuz34@mail.ru;
5. **Акназарова Шафоат Икболиддиновна** – к. ф.-м. н., Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, ведущий научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред. E-mail: shafoat83@mail.ru;
6. **Дустов Алишер Искандарович** – Научно-исследовательский институт Таджикского национального университета, старший научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред. E-mail: alidust@mail.ru.

ФИЗИКА

УДК 577.3, 539.12
Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Б.И.Махсуд, Х.Хабибуллоев[*], М.Х.Матробиён

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СДВИГ ЧАСТОТ ИК-ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ СЫВОРОТКИ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Таджикский национальный университет,
[*]Национальная академия наук Таджикистана
[*]Худжандский научный центр НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана Ф.К.Рахими 21.05.2025 г.)

В работе представлены результаты ИК-Фурье спектроскопии сыворотки крови после выдержки на воздухе 3, 5 и 7 суток и облучения тепловыми нейтронами с потоками 1.3×10^8 н/см², 2.16×10^8 н/см² и 3×10^8 н/см². Облучение вызывает смещение полос поглощения, связанных с фосфатными (1082 см⁻¹), карбоксильными (1242 см⁻¹), аммонийными (1315 см⁻¹), гидроксильными и амидными (3068 см⁻¹) группами. Сдвиги зависят от времени выдержки и величины потока тепловых нейтронов. Наибольшие изменения наблюдаются в области валентных и деформационных колебаний, что указывает на перестройку структуры белков, липидов и других биомолекул. Результаты подтверждают высокую чувствительность ИК-спектроскопии к изменениям свойств органических веществ при радиационном воздействии и её потенциал в поиске биомаркеров.

Ключевые слова: *тепловые нейтроны, сыворотка крови, сдвиг частот, ядерная реакция, радиационный захват, инфракрасная спектроскопия.*

В работе исследуется влияние малых потоков тепловых нейтронов на сдвиги полос поглощения в ИК-спектрах сыворотки крови человека. Известно [1], что даже малые дозы ионизирующего излучения могут вызывать структурные изменения в биологических системах. Но при взаимодействии нейтронов с веществом происходят процессы захвата и рассеяния, особенно выраженные при тепловых энергиях (~0.025 эВ). Изучение таких взаимодействий актуально как для ядерной физики, так и для биомедицинских приложений, включая нейтронно-активационный анализ [2,3].

Исследования [4] показывают, что слабые потоки тепловых нейтронов могут вызывать изменения в структуре окружения ДНК, свойствах семян и выживаемости бактерий *E. coli*, однако механизмы этих эффектов, включая радиационный гормезис, остаются недостаточно изученными.

Физико-химические методы, включая инфракрасную спектроскопию, широко используются в медицине для выявления даже незначительных изменений в составе биожидкостей. ИК-спектроскопия позволяет анализировать молекулярные нарушения, что важно для ранней диагностики заболеваний [6-8].

Адрес для корреспонденции: *Матробиён Мехроб Хуррамзод. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17, Таджикский национальный университет. E-mail: matrobov.mehrob@gmail.com.*

Благодаря высокой чувствительности и простоте, ИК-спектроскопия – перспективный метод для оценки влияния слабых потоков тепловых нейтронов на состав и структуру биожидкостей, включая сыворотку крови [1,5].

Экспериментальная часть

В исследовании использовалась сыворотка крови здорового мужчины 29 лет, полученная из венозной крови методом центрифугирования. Образцы облучались тепловыми нейтронами от источника Pu-Be при разных потоках. Изучался сдвиг полос поглощения в ИК-спектрах сыворотки в зависимости от интенсивности облучения.

Для регистрации ИК-спектров сыворотку высушивали при 60°C более 3 часов, смешивали с KBr и таблетировали. Спектры снимались на Фурье-спектрофотометре IRAffinity-1S (Shimadzu, Япония).

Результаты

На рис. 1 с целью иллюстрации приведен ИК-спектр исследуемой сыворотки, выдержанной 3 суток на воздухе и в табл. 1 приведены характеристические полосы поглощения и их отнесение к различным группам.

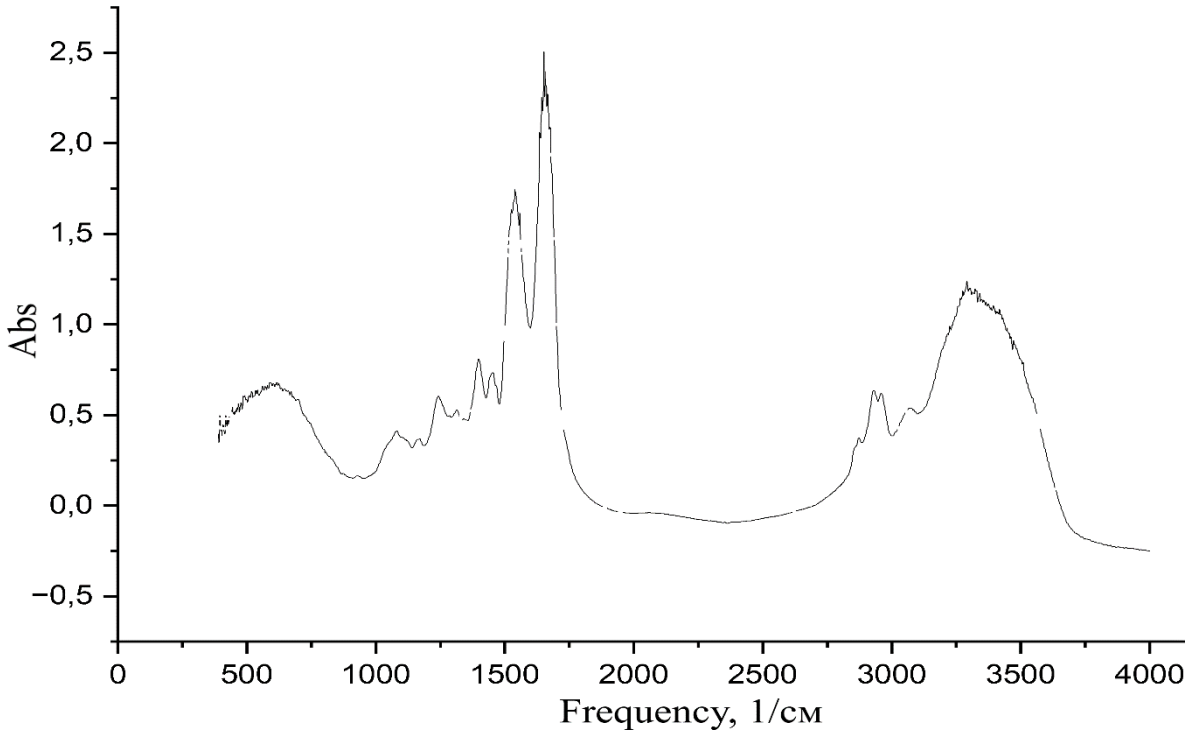


Рис. 1. ИК-спектр сыворотки крови после выдержки 3 суток.

Таблица 1

Частоты полос поглощения наиболее важных характеристических групп в сыворотке крови здорового человека

$см^{-1}$	⟷ Отнесения
3207 (3192)	⟷ Связанные -OH и -NH
3020-3000	⟷ (-CH); ненасыщенные жирные кислоты, сложные эфиры холестерола
2990-2950	$\overset{ac}{\longleftrightarrow}$ ($-CH_3$); сложные эфиры холестерола; триглицериды
2950-2880	$\overset{ac}{\longleftrightarrow}$ ($-CH_2$); жирные кислоты; фосфолипиды
2880-2860	$\overset{c}{\longleftrightarrow}$ ($-CH_3$); сложные эфиры холестерола; триглицериды; глицерол
2870-2830	$\overset{c}{\longleftrightarrow}$ ($-CH_2$); жирные кислоты; фосфолипиды
1480-1430	$<=_{ac}$ ($-CH_3$); $<=_{ac}$ ($-CH_2$); $<=_{c}$ ($-CH_3$); $<=_{c}$ ($-CH_2$); жирные кислоты; фосфолипиды; триглицериды
1430-1360	⟷ ($-COO^-$); аминокислоты
1311 (1300)	<= ($-NH_3^+$)
1244 (1241)	⟷ (-C-OH), ацетатные группы, ⟷ (-C-O-); $\overset{ac}{\longleftrightarrow}$ (O-P=O)
1084 (1076)	$\overset{c}{\longleftrightarrow}$ (-C-P=O) (PO_3^-) и $<=_{c}$ (-C-OH)

Условные обозначения: ⟷ валентные колебания, <= - деформационные колебания; с- симметричные, ас- ассиметричные колебания

В процессе воздействия потока нейтронов образец одновременно подвергался и действию выдержки на воздухе. Для исключения фактора действия воздуха на частоту полос поглощения сыворотки, от частоты полос поглощения после воздействия отнимали частоту полос поглощения, выдержанных равным времени воздействия потока нейтронов. В табл. 2 приведены частоты ИК-спектра сыворотки после выдержки на воздухе и воздействия потока тепловых нейтронов.

Таблица 2

Частоты ИК полос сыворотки выдержанных на воздухе 3, 5 и 7 суток и облучённых потоком тепловых нейтронов.

№	3 сут. необ.	$1{,}3\cdot10^8$ н/см^2	Разность	5 сут. необ.	$2{,}16\cdot10^8$ н/см^2	Разность	7 сут. необ.	$3\cdot10^8$ н/см^2	Разность
	ν_1, $см^{-1}$	ν_2, $см^{-1}$	ν_1- ν_2	ν_1, $см^{-1}$	ν_2, $см^{-1}$	ν_1- ν_2	ν_1, $см^{-1}$	ν_2, $см^{-1}$	ν_1- ν_2
1	1082	1078	4	1080	1080	0	1080	1082	-2
2	1242	1240	2	1244	1238	6	1242	1240	2
3	1315	1313	2	1317	1315	2	1311	1311	0
4	1342	1340	2	1346	1346	0	1342	1342	0
5	1398	1398	0	1398	1398	0	1400	1398	2
6	1454	1454	0	1452	1454	-2	1452	1454	-2
7	2872	2873	-1	2872	2873	-1	2872	2873	-1
8	2927	2931	-4	2931	2929	2	2931	2931	0
9	2958	2956	2	2858	2962	-4	2956	2960	-4
10	3068	3066	2	3066	3066	0	3068	3066	2

Как видно из табл. 2, при выдержке сыворотки в течение 3 суток наблюдается полоса поглощения с частотой 1082 $см^{-1}$. После облучения образца тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ (в течение 3 суток), данная полоса смещается в область более низких частот на 4 $см^{-1}$ и проявляется при 1078 $см^{-1}$. Облучение потоком нейтронов 2.16×10^8 $н/см^2$ не вызывает дальнейшего изменения частоты полосы – она остаётся на уровне 1080 $см^{-1}$. Последующее облучение потоком 3×10^8 $н/см^2$ приводит к её смещению в область более высоких частот, до 1082 $см^{-1}$. Полоса поглощения на частоте 1082 $см^{-1}$ относится к симметричными валентными колебаниями фосфатной группы (–C–P=O) или фосфатной кислоты ($–PO_3^{2-}$), а также к симметричными деформационным колебаниям связей C–O в карбоксильной группе (–C–OH) (здесь и далее использовали табл. 1). При выдержке образца в течение трёх суток формируется полоса поглощения с частотой 1242 $см^{-1}$. Облучение тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ приводит к её смещению в область более низких частот на 2 $см^{-1}$, при этом полоса проявляется при 1240 $см^{-1}$. После облучения потоком 2.16×10^8 $н/см^2$ данная полоса смещается в область более низких частот на 6 $см^{-1}$ и фиксируется при 1238 $см^{-1}$. Облучение тепловыми нейтронами с потоком 3×10^8 $н/см^2$ сдвигает полосу в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и она наблюдается при 1240 $см^{-1}$. Данная полоса относится к валентным колебаниям (-C–OH) гидроксильных групп, валентным колебаниям ацетатных групп (-C–O–) и асимметричным валентным колебаниям фосфатной группы (O=P–O). После облучения тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ полоса поглощения с частотой 1315 $см^{-1}$ смещается в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и наблюдается при 1313 $см^{-1}$. Облучение потоком 2.16×10^8 $н/см^2$ сдвигает полосу в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и она фиксируется при 1315 $см^{-1}$, после облучения потоком тепловых нейтронов 3×10^8 $н/см^2$ рассматриваемая полоса не изменяет своего положения. Полоса поглощения на частоте 1315 $см^{-1}$ относится к деформационным колебаниям аммонийной группы ($–NH_3^+$). Это колебания, связанные с изменением углов между атомами водорода и азота в ионной форме аммонийной группы. При выдержке в течение трёх суток и облучении тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ полоса поглощения с частотой 1342 $см^{-1}$ смещается в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и наблюдается при 1340 $см^{-1}$. Облучение потоком 2.16×10^8 $н/см^2$ не меняет её положение, она не смещается, как не изменяет своей частоты и при облучении потоком 3×10^8 $н/см^2$. Полоса поглощения на частоте 1342 $см^{-1}$ соответствует валентным колебаниям C–N связей ароматических аминов или других соединений, содержащих C–N группы, связанных с ароматическими кольцами. При выдержке в течение трёх суток и облучении тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ частота полосы поглощения 1398 $см^{-1}$ не изменяется. При последующем облучении потоком 2.16×10^8 $н/см^2$ частота полосы 1398 $см^{-1}$ также остаётся стабильной и не смещается, а после облучения потоком 3×10^8 $н/см^2$ смещается в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и фиксируется при 1398 $см^{-1}$. Полоса поглощения на частоте 1398 $см^{-1}$ относится к валентным колебаниям карбоксилатной группы ($-COO^-$) в аминокислотах или их производных, например, в ионизированных карбоксильных группах, характерных для аминокислот в физиологических условиях. При облучении тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 $н/см^2$ частота полосы поглощения 1454 $см^{-1}$ остаётся неизменной. При последующем облучении потоком 2.16×10^8 $н/см^2$ полоса с частотой 1452 $см^{-1}$ смещается в область более высоких частот на 2 $см^{-1}$, проявляясь при 1454 $см^{-1}$, которая после облучения потоком 3×10^8 $н/см^2$ также смещается в область высоких частот на 2 $см^{-1}$ и фиксируется при

1454 $см^{-1}$. Полоса поглощения на частоте 1454 $см^{-1}$ соответствует асимметричным деформационным колебаниям CH_3 (метильных) и CH_2 (метиленовых) групп, а также симметричным деформационным колебаниям CH_3 и CH_2 в жирных кислотах, фосфолипидах и триглицеридах. При выдержке образца в течение трёх суток формируется полоса поглощения с частотой 2872 $см^{-1}$. Облучение тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 н/$см^2$ приводит к её смещению в область более высоких частот до 1 $см^{-1}$, и полоса фиксируется при 2873 см. После облучения потоком 2.16×10^8 н/$см^2$ она смещается в область более высоких частот до 1 $см^{-1}$ и проявляется при 2873 $см^{-1}$, последующее облучение тепловыми нейтронами с потоком 3×10^8 н/$см^2$ также сдвигает эту полосу в область более высоких частот до 1 $см^{-1}$, фиксируя при 2873 $см^{-1}$. Полоса поглощения на частоте 2872 $см^{-1}$ соответствует симметричным валентным колебаниям С-Н связей в метильных (-CH_3) группах. Эта полоса характерна для сложных эфиров холестерола, триглицеридов и глицерола, где присутствуют алифатические углеводородные цепи. При выдержке образца в течение трёх суток формируется полоса поглощения с частотой 2927 $см^{-1}$. Облучение тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 н/$см^2$ приводит к её смещению в область более высоких частот на 4 $см^{-1}$ и полоса фиксируется при 2931 $см^{-1}$. После облучения потоком 2.16×10^8 н/$см^2$ она смещается в область более низких частот на 2 $см^{-1}$ и проявляется при 2929 $см^{-1}$. Дальнейшее облучение тепловыми нейтронами с потоком 3×10^8 н/$см^2$ не изменяет частоту полосы и она остаётся неизменной. Полоса поглощения на частоте 2927 $см^{-1}$ соответствует асимметричным валентным колебаниям С-Н связей в метиленовых (-CH_2) группах. Эта полоса часто наблюдается в структурах жирных кислот и фосфолипидов, которые содержат длинные углеводородные цепи. При выдержке образца в течение трёх суток формируется полоса поглощения с частотой 2958 $см^{-1}$. Облучение тепловыми нейтронами с потоком 1.3×10^8 н/$см^2$ приводит к её смещению в область более низких частот до 2 $см^{-1}$ и полоса фиксируется при 2956 $см^{-1}$. После облучения потоком 2.16×10^8 н/$см^2$ она смещается в область более высоких частот до 4 $см^{-1}$ и проявляется при 2962 $см^{-1}$, которая под воздействием тепловых нейтронов с потоком 3×10^8 н/$см^2$ смещается в область более высоких частот до 4 $см^{-1}$ и наблюдается при 2960 $см^{-1}$. Полоса поглощения на частоте 2958 $см^{-1}$ соответствует асимметричным валентным колебаниям С-Н связей в метильных (-CH_3) группах. Такая полоса характерна для молекул, содержащих алифатические углеродные цепи, таких как жирные кислоты, фосфолипиды, триглицериды, а также сложные эфиры холестерола. При выдержке образца в течение трёх суток регистрируется полоса поглощения с частотой 3068 $см^{-1}$. Под воздействием тепловых нейтронов с потоком 1.3×10^8 н/$см^2$ происходит её смещение в область более низких частот до 2 $см^{-1}$ и полоса фиксируется при 3066 $см^{-1}$. После облучения тепловыми нейтронами с потоком 2.16×10^8 н/$см^2$ она смещается в область более низих частот до 2 $см^{-1}$ и проявляется при 3066 $см^{-1}$. Рассматриваемая полоса под воздействием тепловых нейтронов с потоком 3×10^8 н/$см^2$ также смещается в область более низких частот до 2 $см^{-1}$ и наблюдается при 3066 $см^{-1}$. Данная полоса соответствует валентным колебаниям О-Н (гидроксильных) и N-H (амидных или аминогрупп) связей. Эти колебания характерны для молекул, содержащих гидроксильные группы (-OH) и аминогруппы (-NH), которые часто встречаются в белках, аминокислотах (например, тирозине, треонине, сирине) и других биологически активных соединениях, таких как фенолы и амиды, в сыворотке крови.

О б с у ж д е н и е

Результаты ИК-спектроскопии сыворотки крови, выдержанной на воздухе 3, 5 и 7 суток и облучённой тепловыми нейтронами (1.3×10^8–3×10^8 н/см^2), показали сдвиги полос поглощения, отражающие изменения в окружении и структуре биомолекул. Особенно заметны сдвиги в области фосфатных (1082→1078 см$^{-1}$) и карбоксильных (1242-1244 см$^{-1}$) групп, что может быть связано с ослаблением (фосфатные группы) или усилением (карбоксильные группы) в окружении водородных связей. Аммонийные группы (1311-1317 см$^{-1}$) демонстрируют равномерные сдвиги в начальной стадии воздействия потока и последующую стабильность, вероятно обусловленные изменениями в ионной форме NH_3^+. Полоса C–N колебаний (1342–1346 см$^{-1}$) реагирует на поток, смещаясь в начале, далее стабилизуется, в то время как карбоксилатные группы (1398–1400 см$^{-1}$) вначале стабильны, далее смещаются. Изменения в области высоких частот (2872–2958 см$^{-1}$) отражают перестройку липидных цепей. Устойчивый сдвиг O–H и N–H колебаний (3068→3066 см$^{-1}$) может указывать на изменение конформации белков.

В ы в о д ы

Показано, что ИК-спектроскопия эффективно фиксирует структурные изменения биомолекул состава сыворотки крови человека при воздействии тепловых нейтронов. Наибольшие сдвиги частот полос поглощения в ИК спектре наблюдаются в областях фосфатных, карбоксильных, аммонийных и гидроксильных групп, что указывает на изменение водородных связей. Установлено, что липидные цепи перестраиваются. Некоторые полосы, например на 1342 см$^{-1}$ и 1398 см$^{-1}$, остаются относительно стабильными, что свидетельствует о стойкости колебаний C–N связей ароматических аминов или других соединений, содержащих C–N группы, связанных с ароматическими кольцами, а также карбоксилатных групп. Полоса на 3068 см$^{-1}$ стабильно смещается, что может указывать на ослабление водородных связей в белках. Полученные данные свидетельствуют о структурно-конформационных перестройках в биомолекулах состава сыворотки под действием нейтронного излучения и могут использоваться для оценки радиочувствительности и разработки биомаркеров.

Поступило 21.05.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Махсудов Б.И., Матробиён М.Х. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на интенсивность полос поглощения инфракрасного спектра цельной крови. – Вестник филиала Московского государственного университета им. М.Ю. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук, 2023, т. 1, №1 (29), с. 58-66
2. Махсудов Б.И., Нигораи З. Эффекты при взаимодействии малых потоков тепловых нейтронов с веществом. Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2020, №1, с. 96-106.
3. Махсудов Б. И., Салимов К. Х., Нигораи З. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на скорость роста бактерий Rhizobium IS TAAS-80 TJ. – Доклады НАН Таджикистана, 2020, т. 63, №11-12, с. 723-726.
4. Жижина Г.П., Липсон А.Г., Гагина И.А., Васильева С.В., Бородин М.К., Саунин Е.И., Цивадзе А.Ю. Структурные превращения макромолекул ДНК в водно-солевом растворе и выживаемость бактерий

Escherichia coli в ультраслабом поле термализованных нейтронов. – ДАН РФ, 2010, т.431, №1, с. 123-128.

5. Б. И. Махсудов, Н. У. Мулллоев, З. Нигора. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектр бактерий Rhizobium phaseoli IS TAAS-80 TJ и Bacillus megaterium var. Phosphaticum. – Доклады НАН Таджикистана, 2021, т. 64, №7-8, с. 406-412.
6. Рапопорт Ж.Ж., Балуева Г.Р. Метод инфракрасной спектроскопии при изучении злокачественных болезней крови. – В кн.: Сборник научных трудов Красноярского медицинского института. – Красноярск: Изд-во КГМИ, 1963, с. 324-328.
7. Федунь А.М., Кукош М.В., Гордецов А.С. Роль инфракрасной спектроскопии сыворотки крови в комплексной диагностике рака легкого. – Нижегородский мед журнал, 2002, №1, с.60-65.
8. Гордецов А.С. Диагностическая ИК-спектроскопия. Настоящее и будущее – Нижегородский мед. журнал, 2002, №4, с.95-98.

Б.И.Махсуд, Х.Хабибуллоев*, М.Х.Матробиён

ТАЪСИРИ НУРБОРОНКУНИИ НЕЙТРОН БА ҒЕҶИШИ БАСОМАДИ ТАСМАИ ФУРӮБУРДИ СПЕКТРИ ИНФРАСУРХИ ЗАРДОБИ ХУНИ ИНСОН

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон,

****Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,***

****Маркази илмии Хуҷанд АМИ Тоҷикистон***

Дар кори мазкур натиҷаҳои таъсири ҳаво дар давоми 3, 5 ва 7 шабонарӯз ва нурборонкунӣ бо нейтронҳои ҳароратӣ бо сели ками нейтронҳои ҳароратии 1.3×10^8, 2.16×10^8 ва 3×10^8 н/см² ба спектрҳои инфасурхи зардоби хун оварда шудааст. Нурборонкунӣ боиси тағирёбии тасмаҳои фурӯбурди алоқаманд ба гурӯҳҳои фосфат (1082 см$^{-1}$), карбоксил (1242 см$^{-1}$), аммоний (1315 см$^{-1}$), гидроксил ва амид (3068 см$^{-1}$) мегардад. Ғеҷишҳо аз вақти нигоҳдорӣ ва интенсивияти афканишот вобаста аст. Тағйироти калонтарин дар минтақаи валентӣ ва деформатсионӣ мушоҳида шуданд, ки аз тағирёбии сохтори сафедаҳо, липидҳо ва дигар биомолекулаҳо шаҳодат медиҳад. Натиҷаҳо ҳассосияти баланди спектроскопияи инфрасурхро ба таъсири радиатсионӣ ва потенсиали онро дар ҷустуҷӯи нишонҳои биологӣ (бионишонҳо) муайян мекунанд.

Калимаҳои калидӣ: *нейтронҳои ҳароратӣ, нурборонкунӣ, зардоби хун, ғеҷиши басомад, реаксияи ҳастаӣ, забти радиатсионӣ, спектроскопияи инфрасурх.*

B.I.Makhsud, H.Khabibulloev[*], M.Kh.Matrobiyon

EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION ON THE FREQUENCY SHIFT OF IR ABSORPTION BANDS OF HUMAN BLOOD SERUM

Tajik National University,

[*]National Academy of Sciences of Tajikistan,

[*]Khujand Scientific Center, NAS of Tajikistan

The paper presents the results of IR Fourier spectroscopy of blood serum after exposure to air for 3, 5 and 7 days and irradiation with thermal neutrons with fluxes of 1.3×10^8, 2.16×10^8 and 3×10^8 n/cm². Irradiation causes a shift in the absorption bands associated with phosphate (1082 cm^{-1}), carboxyl (1242 cm^{-1}), ammonium (1315 cm^{-1}), hydroxyl and amide (3068 cm^{-1}) groups. The shifts depend on the exposure time and radiation intensity. The greatest changes are observed in the region of stretching and deformation vibrations, indicating rearrangements in the structure of proteins, lipids and other biomolecules. The results confirm the high sensitivity of IR spectroscopy to radiation exposure and its potential in the search for biomarkers.

Key words: *thermal neutrons, irradiation, blood serum, frequency shift, nuclear reaction, radiation capture, infrared spectroscopy.*

Сведения об авторах:

1. **Махсуд Барот Исломзода** – доктор физико-математических наук, профессор, Таджикский национальный университет, заведующий кафедры ядерной физики. E-mail: maksudov_barot@mail.ru;
2. **Хабибуллоев Хамидуллох** – кандидат физико-математических наук, Худжандский научный центр Национальной Академии наук Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: hamidullo1950@gmail.ru;
3. **Матробиён Мехроб Хуррамзод** – Таджикский национальный университет, ассистент кафедры оптики и спектроскопии физического факультета. E-mail: matrobov.mehrob@gmail.com.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 55.551.3

Специальность: 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Ш.А.Файзуллоев

ОБ ОПОЛЗНЕВОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТАДЖИКИСТАНА

Национальная академия наук Таджикистана,

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана

(Представлено членом-корреспондентом НАН Таджикистана А.Р. Файзиевым 30.06.2025 г.)

Статья посвящена описанию карты восприимчивости территории Таджикистана к возникновению оползней. Обнаружено, что в Северном инженерно-геологическом регионе Таджикистана отсутствуют склоны с очень высокой восприимчивостью. Выявленно, что даже при отсутствии оползневых явлений на Северо-Восточном инженерно-геологическом регионе, на его склонах наблюдаются все пять классов оползневой восприимчивости. Вдобавок к этому дается аналогичное описание территорий Центрального, Юго-Западного и Юго-Восточного инженерно-геологических регионов.

Ключевые слова: *оползни, восприимчивость, зона, класс, хребет, модель.*

Таджикистан расположен в южной части Средней Азии. Горы занимают 93% от всех 143.1 тыс. км^2 территории. Все страны, граничащие с Таджикистаном (на западе и северо-западе – Узбекистан, на севере – Кыргызстан, на востоке – Китай и на юге – Афганистан), также являются горными странами. Гигантские горы Тянь-Шаня и Памира составляют основной орографический облик Таджикистана [1].

На основе рельефа и геологического строения территорию Таджикистана условно делят на пять крупных инженерно-геологических регионов: Северный, Северо-Восточный, Центральный, Юго-Западный и Юго-Восточный (рис. 1.). Описание карты оползневой восприимчивости осуществляется в соответствии с этими инженерно-геологическими регионами, поскольку подход имеет большое значение [1].

При создании карты использовались 12 факторов оползнеобрзования. Поскольку ранее в [1] приведены результаты их взвешивания, в данной статье акцент сделан исключительно на описании карты, без повторного анализа этих данных.

Адрес для корреспонденции: *Файзуллоев Шохнаваз Абдукодирович, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: shohnavaz.faizulloev@mail.ru.*

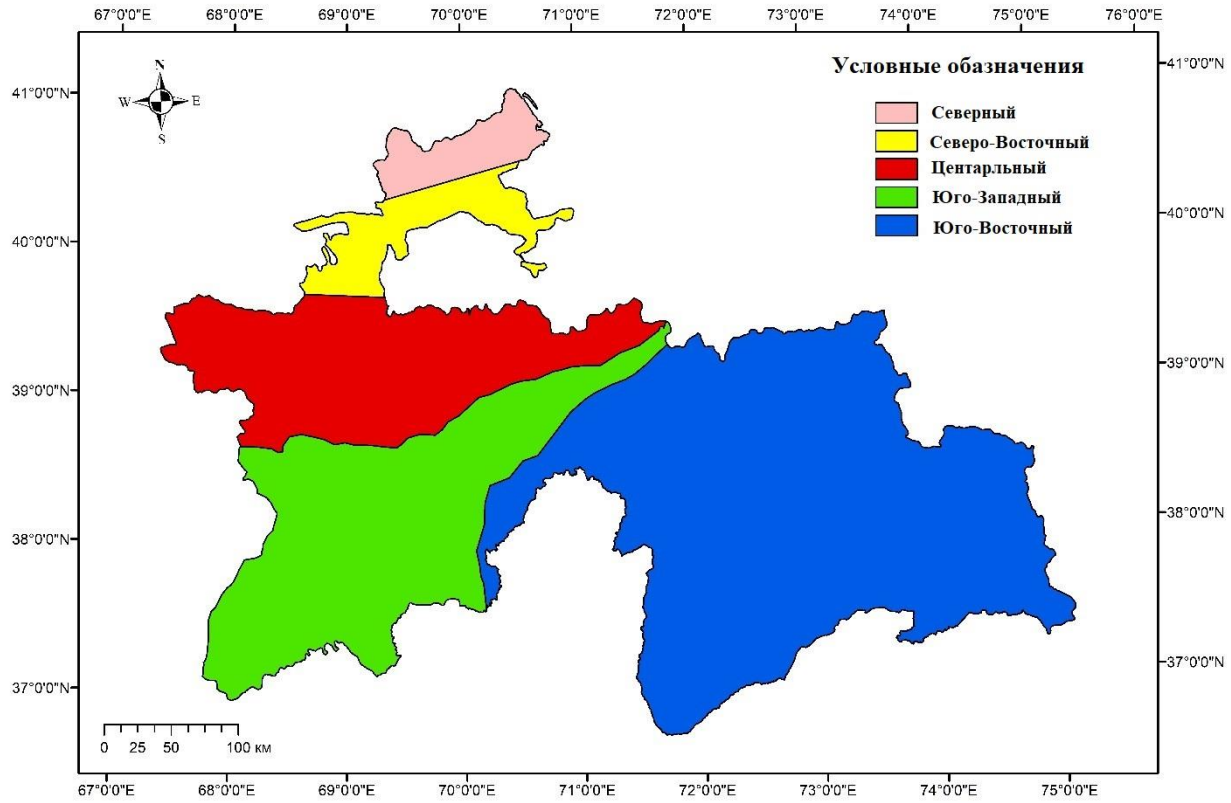


Рис. 1. Карта инженерно-геологических регионов Таджикистана.

Результаты исследования

Очень низкая восприимчивость. Зоны с очень низкой восприимчивостью занимают 17% (табл.) от общей площади территории Таджикистана и представлены, главным образом, в пределах Юго-Западного, Юго-Восточного и частично Северо-Восточного инженерно-геологических регионов. Геоморфологический они соответствует равнинным и плоскогорным участкам с пологим рельефом, не превышающим критических значений уклона, при которых активизация склоновых процессов становятся вероятной.

В Юго-Западном инженерно-геологическом регионе очень низкая восприимчивость наиболее ярко выражена на территории межгорных и предгорных равнин. Эти участки характеризуются устойчивыми геологическими условиями, минимальной расчленённостью рельефа и отсутствием активных оползневых процессов. Кроме того, они плотно заселены, активно используются для селького хозяйства и имеют развитую инфраструктуру, что подчёркивает важность их устойчивости с инженерно-геологической точки зрения.

В Центральном инженерно-геологическом регионе Таджикистана зоны с очень низкой восприимчивостью расположены на крайнем востоке Туркестанского хребта и на левом берегу реки Зеравшан, охватывая крайнюю западную часть Зеравшанского хребта.

Северо-Восточный инженерно-геологический регион также содержит обширные участки с очень низкой восприимчивостью, в основном в пределах северо-западной части региона. Несмотря на то, что в этом регионе не наблюдаются зарегистрированные оползни, присутствие участков с иными

классами восприимчивости требует осторожного подхода при планировании инфраструкурных проектов.

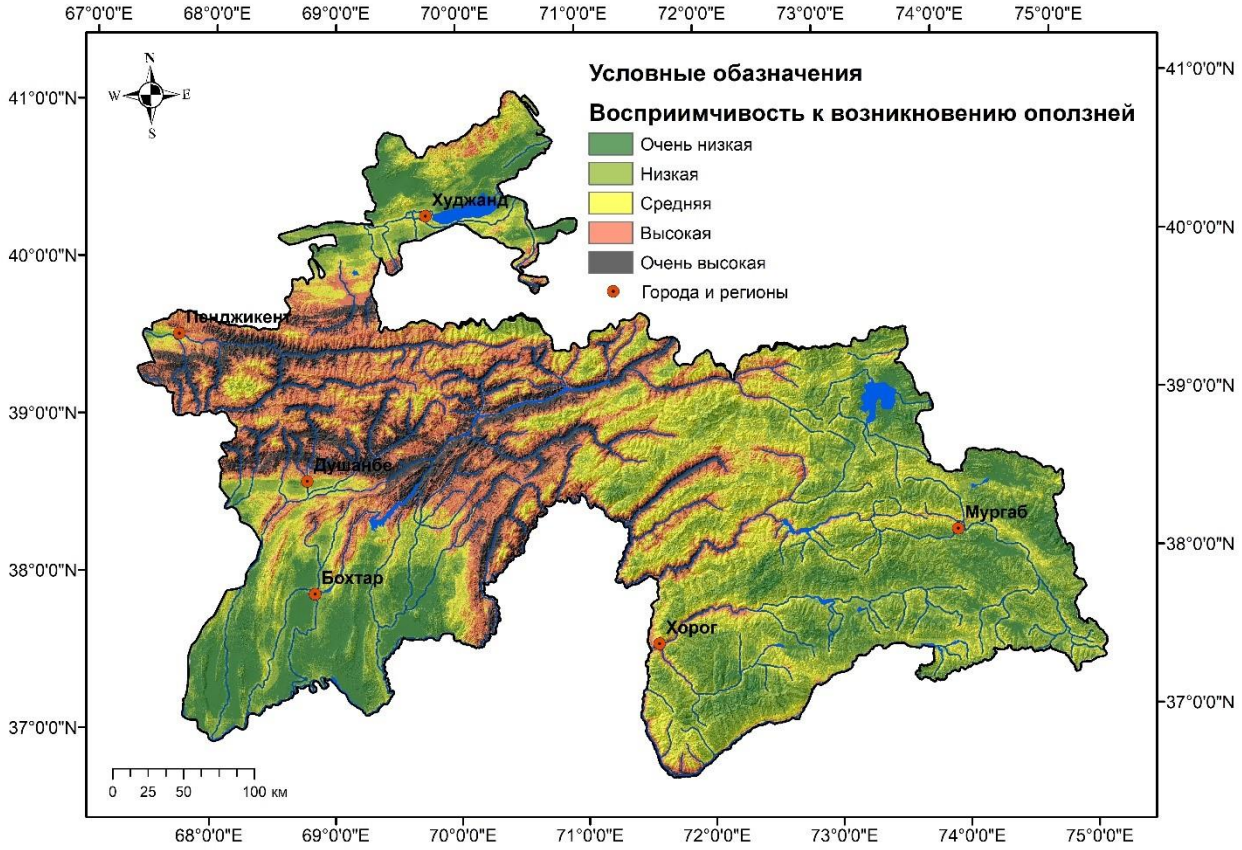


Рис. 2. Карта оползневой восприимчивости территории Таджикистана [2].

В Юго-Восточном инженерно-геологическом регионе зоны с очень низкой восприимчивостью приурочены преимущественно к Восточному Памиру – высокогорному плоскогорью с резко континентальным климатом и малым количеством атмосферных осадков. Эти участки малонаселенны и слабо освоены, однако играют стратегическую роль в транспортном отношении, что требует надёжной оценки их геодинамической стабильности.

Низкая восприимчивость. Зона с низкой восприимчивостью имеет наибольшую площадь среди всех классов карты оползневой восприимчивости Таджикистана – 29% (таб.) от общей территории. Её распространение охватывает практически все инженерно-геологические регионы Таджикистана, и она представляет собой переходный класс между устойчивыми и потенциально опасными склонами. Геоморфологически низковосприимчивые участки приурочены к предгорным зонам, пологим склонам и плоскогорьям с умеренным уклоном.

В Северном инженерно-геологическом регионе зоны с низкой восприимчивостью приурочены к подножиям гор и предгорным участкам Кураминского и Моголтауского хребтов. Здесь они охватывают как равнинные, так и слаборасчленённые склоны, где литологический состав грунтов благоприятствует устойчивости склонов, а геодинамическая активность сравнительно невысока.

В Северо-Восточном инженерно-геологическом регионе зоны с низкой восприимчивостью распространены повсеместно. Это объясняется преобладанием устойчивых структурно-литологических комплексов и незначительной крутизной склонов.

Таблица

Площади классов восприимчивости (%) (Файзуллоев Ш.А.)

Степень восприимчивости	Количество пикселей в классе	%
Очень низкая	30203509	17
Низкая	51512987	29
Средняя	42291370	24
Высокая	33177284	19
Очень высокая	20429381	12

В Центральном инженерно-геологическом регионе Таджикистана низковосприимчивые зоны развиты на востоке Туркестанского хребта и левобережье Зеравшана, занимая большую площадь, чем зоны с очень низкой восприимчивостью. В этих участках они охватывают склоны с пониженной крутизной и слабой расчленённостью, часто сложенные относительно устойчивыми породами.

В Юго-Западном инженерно-геологическом регионе Таджикистана такие зоны характерны для равнинных и предгорных частей региона.

На карте видно, что склоны Рушанского, Шугнанского, Южно-Аличурского, Шохдаринского хребтов и восточные отроги Вахонского хребта имеют низкую восприимчивость к возникновению оползней. В Юго-Восточном инженерно-геологическом регионе ею также характеризуется плоскогорная часть. Частично низкая восприимчивость присуща Заалайскому, Дарвазскому, Язгуламскому, Петра Первого, Академии Наук, Белеулийскому, Сарикульскому и другим хребтам.

Средняя восприимчивость. Зона со средней восприимчивостью занимает около 24% (табл.) территории Таджикистана и играет ключевую роль в формировании общей оползневой опасности страны. Она представляет собой переходный уровень между относительно устойчивыми участками и зонами повышенного риска. Эти зоны приурочены, как правило, к нижним и средним частям склонов с уклонами от 20° до 30°, на которых сочетаются как природные, так и антропогенные триггеры оползнеобразования. Часто такие склоны располагаются вблизи долин рек, у подножий хребтов, в зонах тектонических нарушений и на участках с неоднородным литологическим составом.

В Северном инженерно-геологическом регионе средняя восприимчивость отмечается на склонах Кураминского хребта, особенно в его северной, южной и юго-западной частях. Наиболее подвержены образованию оползней нижние склоны, где скапливаются водно-эрозионные потоки и формируются зоны переувлажнения, способствующие потере устойчивости. Аналогичные участки выявлены на водораздельных линиях Моголтауского хребта, однако их площадь ограниченна.

В Северо-Восточном инженерно-геологическом регионе средняя восприимчивость распространена довольно широко, несмотря на слабое развитие оползней согласно инвентаризационной карте.

В Центральном инженерно-геологическом регионе зоны средней восприимчивости обладают широкой территориальной представительностью. Особенно выражены они в восточной части региона, где высокая расчленённость рельефа сочетается с активной тектоникой и разнообразием

литологических комплексов. Особое внимания заслуживает участок округлой формы в пределах Айнийского района, где класс средней восприимчивости формирует устойчивый ареал. В других частях Центрального инженерно-геологического региона средняя восприимчивость проявляется мозаично, чаще всего вдоль склонов Туркестанского хребта.

В Юго-Западном инженерно-геологическом регионе Таджикистана средняя восприимчивсть распространена на нижних склонах хребтов, а также на склонах водоразделов Каратакского и Рангонского хребтов.

Средняя восприимчивость к возникновению оползней в Юго-Восточном регионе развита достаточно широко. Высокогорная область (Горный Бадахшан) охватывает большую площадь с такой восприимчивостью, чем область высокого плоскогорья (Восточный Памир).

Высокая восприимчивость. Высокая восприимчивость к возникновению оползней занимает 19% (табл.) от всей площади территорий Таджикистана и характеризируется неравномерным пространственным распределением. Эти участки представляют собой природные условия, которые создают благоприятную обстановку для возникновения оползней даже при отсутствии экстремальных триггеров.

Северный инженерно-геологический регион является ярким примером малой подверженности высокой восприимчивости. Не удивительно, что территории с высокой восприимчивостью приходятся на горную область и склоны Кураминского хребта. На склонах Моголтауского хребта класс с высокой восприимчивостью отсутствует.

Зоны высокой восприимчивости в Северо-Восточном инженерно-геологическом регионе сосредоточены, главным образом, в южной приграничной части, смежной с Центральным инженерно-геологическим регионом, а также на восточных окраинах, где резко возрастает крутизна склонов.

Центральный инженерно-геологический регион Таджикистана охватывает обширную территорию, включающую Туркестанский, Зеравшанский и Гиссарский хребты. Этот регион представляет собой один из наиболее сложных в инженерно-геологическом отношении участков Таджикистана, где тесно переплетены тектонические, литолого-структурные и климатические факторы. Зоны с высокой оползневой восприимчивостью здесь распространены наиболее широко по сравнению с другими регионами.

Основные зоны высокой восприимчивости приурочены к водораздельным линиям и крутым склонам хребтов, особенно в центральной и восточной части Туркестанского хребта, северо-западных участках Зеравшанского хребта и южных склонах Гиссарского массива. Здесь преобладают крутые склоны. Тектонические разломы, пересекающие массивы, создают благоприятные условия для дестабилизации пород. Кроме того, широкое распространение в регионе получили слабоустойчивые, выветренные породы, способные к быстрому насыщению влагой и деформации.

В Юго-Западном инженерно-геологическом регионе высокая восприимчивость наблюдается на склонах хребтов Боботог, Рангон, Аруктой, Каратой, Сарсаряк и Вахш. Эти зоны характеризуются крутыми и расчленёнными склонами, наличием рыхлых осадочных толщ и активной эрозионной деятельностью. Особенно подвержены высокой оползневой восприимчивости участки вблизи рек, где, подмыв и переувлажнение склонов создают дополнительные угрозы. Отдельно следует отметить восточную

часть хребта Сурхку, где зоны высокой восприимчивости формируют устойчивый геодинамический очаг.

Юго-Восточный инженерно-геологический регион охватывает преимущественно территорию Горного Бадахшана и является самым высокогорным и тектонический активным районом страны. Несмотря на преобладание здесь устойчивых плоскогорий и зон вечной мерзлоты, значительная часть склонов характеризуется высокой оползневой восприимчивостью, особенно в долинах крупных рек на участках с развитой тектонической трещиноватостью.

Зоны высокой восприимчивости в данном регионе преимущественно локализованы на верхних частях склонов долин рек Вандж, Язгулом, Гунт, Бартанг и Пяндж, а также в районе их основных притоков. Эти участки подвержены сочетанному влиянию высокой крутизны склонов, неоднородного литологического состава, сезонного таяния снегов и ледников, а также интенсивного дождевого стока, особенно в летние месяцы.

Особую уязвимость демонстрируют восточные отроги Вахонского хребта и отдельные участки Заалайского, Сарикульского и Дарвазского хребтов, где наблюдается активное развитие склоновых деформаций, особенно в районах пересечений тектонических разломов и вечной мерзлоты. Потепление климата и деградация мерзлоты могут стать дополнительном фактором активации оползней.

Также необходимо отметить зону верхнего течения реки Мургаб, где высокая восприимчивость проявляется на крутых береговых склонах в связи с постоянным подмывом и нестабильной инженерно-геологической ситуацией. Подобные условия также характерны для долины реки Обихингоу, где гидрологические особенности, тектоника и активное развитие фрагментации склонов формируют опасные геодинамические узлы.

Очень высокая восприимчивость. Зоны с очень высокой оползневой восприимчивости охватывают около 12% (табл.) территории Таджикистана и представляют наибольшую потенциальную опасность в рамках разработанной модели. Эти участки характеризуются максимальной степенью склоновой нестабильности и концентрацией всех ключевых факторов оползнеобразования.

Северный инженерно-геологический регион полностью исключён из зоны очень высокой оползневой восприимчивости. Согласно результатам моделирования, в этом регионе отсутствуют участки, соответствующие высшему классу оползневой опасности.

В Северо-Восточном инженерно-геологическом регионе, несмотря на отсутствие документированных случаев оползней по инвентаризационным данным, в регионе выявлены отдельные зоны очень высокой восприимчивости. Эти участки сконцентрированы в восточной части, смежной с Центральным регионом, и северной части.

Центральный инженерно-геологический регион представляет собой наиболее опасную с точки зрения оползневой восприимчивости территорию страны. Именно здесь сосредоточенна основная часть площади, классифицированная как зона с очень высокой восприимчивостью к возникновению оползней, что делает регион ключевым в инженерно-геологической оценке природных рисков.

Зоны с очень высокой восприимчивостью в основном приурочены к нижним и средним частям склонов, где наблюдаются наиболее благоприятные условия для накопления влаги, переувлажнения грунтов и ослабления прочностных характеристик горных пород. В этих участках происходит

концентрация поверхностного и подземного стока, инфильтрация талых и дождевых вод, а также динамическое воздействие на породы, подверженные выветриванию и разуплотнению. Средние части склонов часто пересекаются зональными разломами и тектоническими трещинами, что дополнительно повышает геодинамическую нестабильность. Верхние части склонов, напротив, играют роль зон разгрузки, но реже выступают в качестве самостоятельных очагов оползнеобразования.

Особенно чётко такая пространственная структура восприимчивости проявляется на склонах Туркестанского, Зеравшанского и Гиссарского хребтов, а также в районах долин рек Фандарья, Зеравшан и их притоков. Здесь высокая плотность пикселей, соответствующих очень высокой восприимчивости, наблюдается именно у подножий склонов, где формируются тела древних и современных оползней.

В Юго-Западном инженерно-геологическом регионе Таджикистана, несмотря на свои обширные равнинные территории, значительная часть склонов в северо-восточной и центральной части региона характеризуется очень высокой восприимчивостью к возникновению оползней, что делает район одним из критически уязвимых в Таджикистане.

Особенно подвержены высокой оползневой восприимчивости склоны в верхнем течении реки Вахш. Эти участки расположены в зоне повышенной сейсмической активности, характеризующейся высокой плотностью сейсмоактивных разломов, проходящих через крупные хребтовые структуры региона. Наличие активных тектонических разломов усиливает напряжённо-деформированное состояние склонов и способствует их расслоению и ослаблению в глубинной зоне.

Крутые сильно расчленённые склоны здесь часто сложены лёссовыми и лёссовидными грунтами, обладающими специфической структурной неустойчивостью. В сухом состоянии такие породы достаточно прочны, но при увлажнении резко теряют устойчивость, демонстрируя высокую подверженность сдвиговым и оползневым деформациям. В условиях интенсивного весеннего снеготаяния, обильных осадков и подземного дренажа происходит глубокое промачивание этих пород, что ведёт к снижению прочностных характеристик и активации оползней.

Дополнительным фактором риска является активный подмыв подножий склонов рекой Вахш. Сочетания гидродинамической нестабильности создаёт условия для частых обрушений, особенно в местах пересечения долины с тектоническими структурами.

Кроме того, наиболее выраженные зоны очень высокой восприимчивости наблюдаются в восточной части хребта Сурхку, на юго-западных склонах Рангонского и Каратойского хребтов.

Несмотря на обширные высокогорные территории с преобладанием плоскогорного рельефа и вечной мерзлоты, Юго-Восточный инженерно-геологический регион Таджикистана включает рельефно активные участки с очень высокой оползневой восприимчивостью. Наиболее опасные участки локализуются в нижних и средних частях склонов долин рек Вахш, Язгулом, Бартанг, Гунт и Пяндж, где сочетаются неблагоприятные геологические, геоморфологические и климатические условия.

В ы в о д ы

Проведённая оценка оползневой восприимчивости территории Таджикистана выявила выраженную пространственную неоднородность распределения опасных участков, обусловленную геологическими, сейсмическими и климатическими условиями. Установлено, что регионы с равнинным и

плоскогорным рельефом преимущественно относятся к зонам низкой и очень низкой восприимчивостью, в то время как горные районы характеризуются повышенной и высокой степенью подверженности оползневым процессам. Наиболее уязвимыми оказались склоны в пределах Центрального и Юго-Западного инженерно-геологических регионов, особенно в зонах активной тектоники. В Северном инженерно-геологическом регионе полностью отсутствуют участки с очень высокой восприимчивостью, что подтверждает его сравнительно устойчивое положение. Интерес представляет Северо-Восточный инженерно-геологический регион, где, несмотря на отсутствие зарегистрированных оползней, присутствуют все классы восприимчивости, что указывает на потенциальную скрытую опасность и необходимость дополнительного полевого и дистанционного мониторинга. На основании полученных результатов рекомендуется проводить моделирование восприимчивости отдельно по инженерно-геологическим регионам с учётом их геодинамической специфики, а также развивать исследования в бассейновом масштабе. Это особенно важно в условиях интенсивного использования гидроэнергетического потенциала страны и планирования строительства линейных и инженерных сооружений. Карта оползневой восприимчивости, основанная на многофакторном анализе и современных геоинформационных технологий, представляет собой ценный инструмент для пространственного планирования, оценки рисков и принятия инженерно-геологических решений в рамках устойчивого развития Таджикистана.

Работа выполнена в лаборатории оценки сейсмической опасности ИГССС НАНТ при поддержке проекта «Оценка сейсмической опасности территории городов Таджикистана» под номером 0121TJ1166.

Поступило 30.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гидрогеология СССР. Том XLI. Таджикская ССР. Управление геологии Совета Министров Таджикской ССР. Редактор В.С. Самарина – М.: Недра, 1972, с. 472.
2. Файзуллоев Ш.А., Оймухаммадзода И.С. Оползневая восприимчивость территории Таджикистана. – Доклады национальной академии наук Таджикистана, 2024, т. 67, №1-2, с. 88-94.

Ш.А.Файзуллоев

ОИД БА ОСЕБПАЗИРИИ ЯРЧИИ ҲУДУДИ ТОҶИКИСТОН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИ Тоҷикистон

Мақола ба тавсифи харитаи осебпазирии ярчии ҳудуди Тоҷикистон бахшида шудааст. Маълум карда шудааст, ки дар ноҳияи муҳандисӣ-геологии Шимолии Тоҷикистон пастхамиҳои дорои осебпазирии хеле баланд вуҷуд надоранд. Муаян шудааст, ки ҳатто ҳангоми мавҷуд набудани зуҳуротҳои ярчӣ дар ноҳияи муҳандисӣ-геологии Шимолу-Шарқӣ дар пастхамиҳои вай ҳамаи панҷ синфӣ осебпазирии ярчӣ дида мешаванд. Илова бар ин, ҳамингуна тавсиф барои ноҳияҳои муҳандисӣ-геологии Ҷанубу-Ғарбӣ ва Ҷанубу-Шарқӣ оварда шудааст.

Калимаҳои калидӣ: *ярч, осебпазирӣ, минтақа, синф, қаторкуҳ, модел.*

Sh.A.Faizulloev

ABOUT LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY OF TAJIKISTAN TERRITORY

National Academy of Science of Tajikistan,
Institute of Geology, Earthquake and Seismology, NAS of Tajikistan

The article dedicated to the description of landslide susceptibility of Tajikistan territory. Detected that the North part of Tajikistan has no high susceptible slope. It is identified that even with landslide phenomena absence in North-East region, on its slopes all five landslide susceptibility classes are observed. Additional to it the same description for Central, North-West and North-East regions of Tajikistan are given.

Key words: *Landslides, susceptibility, zone, class, ridge, model.*

Сведения об авторе:

1. **Файзуллоев Шохнаваз Абдукодирович** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: shohnavaz.faizulloev@mail.ru.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 55.551.3
Специальность: 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Дж.М.Нарзиев, М.Л.Лоикзода

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ В ДАРВАЗЕ И ЗАПАДНОМ ПАМИРЕ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана
(Представлено членом-корреспондентом НАН Таджикистана А.Р.Файзиевым 30.06.2025 г.)

В статье рассматривается влияние атмосферных осадков на образование оползней в горных районах Дарваза и Западного Памира. С помощью технологий ArcGIS была создана карта распределения осадков и графики, показывающие зависимость частоты оползней от количества осадков.

Ключевые слова: *оползень, фактор, атмосферные осадки, обильные осадки, глинистые грунты, программа ArcGIS, цифровая модель рельефа.*

Введение. В настоящее время исследование оползней приобретает особую значимость, поскольку они представляют серьезную угрозу для жизни и деятельности человека. По всему миру в определённые периоды времени происходят оползневые процессы, приводящие к гибели людей, разрушению инфраструктуры и уничтожению сельскохозяйственных земель. Поэтому важно изучать причины их возникновения, чтобы минимизировать возможные потери [1, 2].

Среди ключевых факторов, влияющих на формирование и активизацию оползней, особую роль играет количество, интенсивность и продолжительность атмосферных осадков [3, 4]. Переувлажнение склонов вследствие длительных дождей или интенсивных ливней приводит к снижению прочности грунтов и повышению их подвижности. Вода, проникая в трещины и поры пород, увеличивает давление поровых вод, что уменьшает сопротивление сдвигу и способствует смещению масс грунта [3-8].

Во время интенсивных осадков часть воды впитывается в почву, а оставшаяся образует поверхностный сток. Этот сток, стекая по склонам, постепенно размывает их поверхность, снижая прочность грунтов и повышая риск оползней. С течением времени такие процессы могут привести к потере устойчивости склонов, что создаёт благоприятные условия для активизации оползней [3, 9, 10].

Особенно опасны ситуации, когда после продолжительного сухого периода наступают обильные осадки. В таких условиях глинистые грунты, растрескавшиеся из-за высыхания, быстро насыщаются водой, что значительно повышает риск возникновения оползней [11-13].

Адрес для корреспонденции: *Нарзиев Джамшед Мирхученович, Лоикзода Мустафо Лоик. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: jamshed13@mail.ru, silver_05@mail.ru.*

Таким образом, количество, интенсивность и продолжительность атмосферных осадков являются одними из основных факторов, влияющих на образование и активизацию оползней.

Для изучения пространственного распределения оползней использовались опубликованные источники [14, 15], а также проводилось дешифрование спутниковых снимков с использованием программы Google Earth Pro в пределах Дарваза и на Западном Памире Таджикистана. В результате исследования было идентифицировано около 91 оползня, представленных на рис. 1.

Для анализа атмосферных осадков в данной работе использованы данные из базы CRU TS версии 4.09, загруженные с сайта https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/. Эти данные охватывают период с 2014 по 2024 гг. CRU TS (Climatic Research Unit Time-Series) — это сеточный климатический продукт, разработанный исследовательским климатическим центром Университета Восточной Англии. База данных предоставляет высокоточные метеорологические данные на глобальной сетке с разрешением 0.5°×0.5° (~56 км) и включает различные параметры, такие как температура, осадки, влажность и другие [16-18].

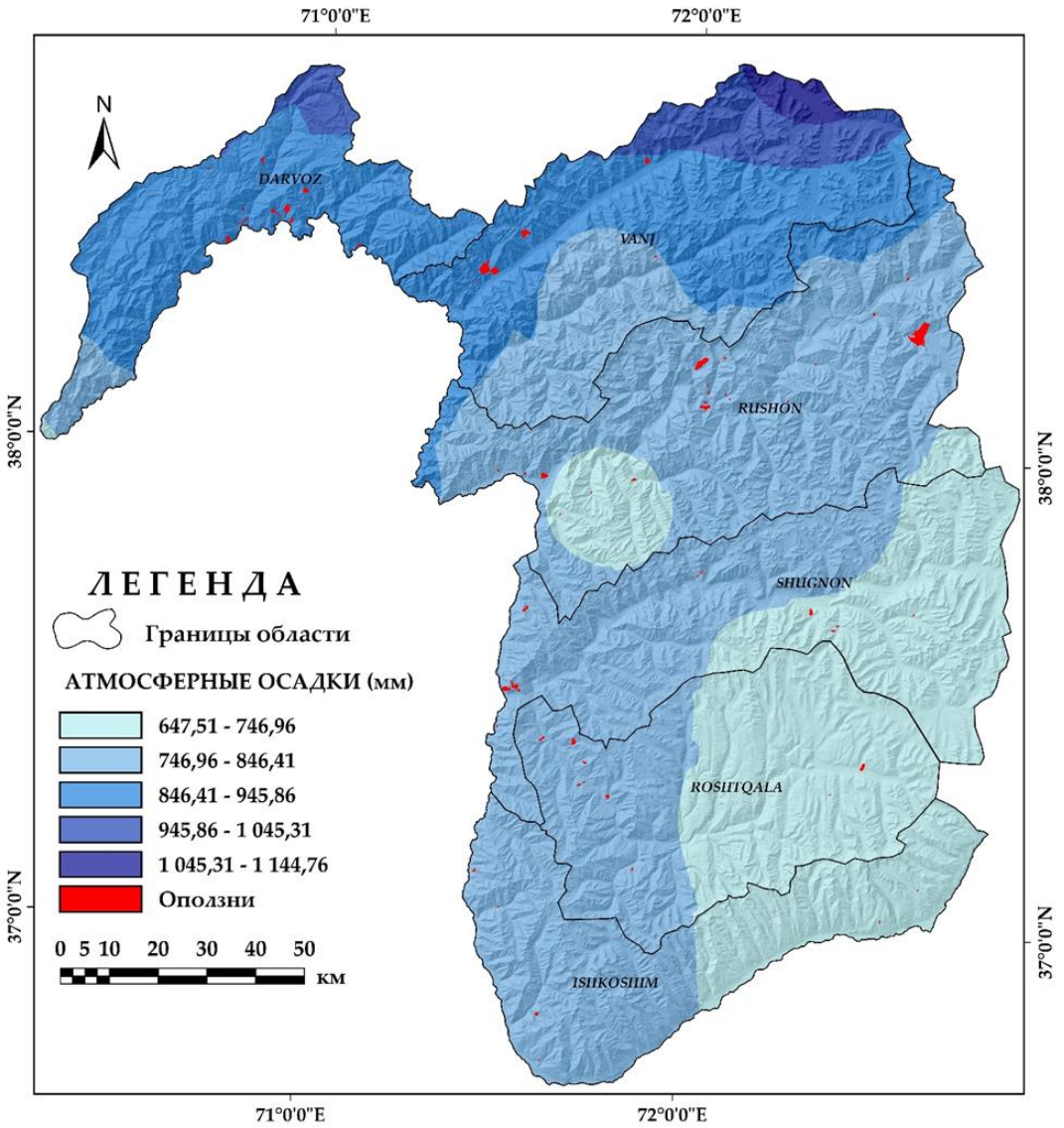


Рис. 1. Карта пространственного распределения атмосферных осадков и оползней.

На основании данных об атмосферных осадках, было вычислено среднее арифметическое значение атмосферных осадков за период с 2014 по 2024 гг. Для дальнейшей обработки данных было изменено пространственное разрешение на 30 м с использованием программы ArcGIS 10.8. Полученные данные были разделены на 5 классов: 1) 647.51 – 746.96 мм, 2) 746.96 – 846.42 мм, 3) 846.42 – 945.87 мм, 4) 945.87 – 1045.32 мм, 5) 1045.32 – 1144.77 мм. В результате была создана карта атмосферных осадков (табл. 1 и рис. 1).

Метод исследования. На современном этапе исследований метод соотношения частот (Frequency Ratio) получил широкое распространение при анализе пространственной взаимосвязи между распределением оползней и влияющими на них факторами. Данный подход позволяет количественно оценить степень корреляции между местами проявления оползневых процессов и причинными природными или антропогенными факторами на исследуемой территории. В рамках настоящего исследования для решения поставленной задачи использовано уравнение соотношения частот, описанное в работах [19].

$$\boldsymbol{FR} = \frac{\left(\boldsymbol{Ni} \ / \boldsymbol{N} \right)}{\left(\boldsymbol{Pi} \ / \boldsymbol{P} \right)},$$

где $\boldsymbol{Ni}$ – количество пикселей оползней в классе факторов i;

$\boldsymbol{N}$ – общее количество пикселей оползней на карте района исследования;

$\boldsymbol{Pi}$ – количество пикселей в классе факторов i;

$\boldsymbol{P}$ – общее количество точек пикселей на карте района исследования [19].

Значение соотношения частот (FR), превышающее 1, указывает на значительное влияние соответствующего фактора на формирование оползневых процессов. При значении FR менее 1 наблюдается слабая взаимосвязь, тогда как значение, близкое к 1, свидетельствует о нейтральной или средней степени влияния [19].

Результаты исследования. Анализ распределения оползневых процессов по различным диапазонам атмосферных осадков показал, что степень влияния данного фактора меняется в зависимости от количества осадков. В некоторых классах осадков наблюдается высокая вероятность возникновения оползней, тогда как в других – их активность практически отсутствует.

Наибольшую уязвимость к оползневым процессам демонстрируют классы атмосферных осадков в диапазонах от 746.96 до 846.42 мм и от 846.42 до 945.87 мм. На долю последнего приходится 34.82 % площади всех зафиксированных оползней, при этом значение соотношения частот (FR) составляет 1.69, что указывает на высокую вероятность возникновения оползней в этом интервале. Вторым по уязвимости является класс с осадками от 746.96 до 846.42 мм, где значение FR составляет 1.21. Несмотря на то, что в этом диапазоне зафиксирована наибольшая площадь проявления оползней — 58.66 %, более низкое значение FR объясняется меньшим объёмом атмосферных осадков, при котором уровень оползневой активности относительно ниже, несмотря на большую охваченную площадь. (табл. 1, рис. 2).

Наименьшую уязвимость к оползневым процессам демонстрируют классы атмосферных осадков в диапазоне от 647.51 до 746.96 мм. Площадь проявления оползней в этом интервале

составляет всего 6.42 %, а значение соотношения частот (FR) – 0.24, что указывает на низкий уровень риска возникновения оползней при таком объёме осадков. Вторым по наименьшей уязвимости является класс осадков в диапазоне от 945.87 до 1045.32 мм, где оползневая активность практически не наблюдается: площадь проявления составляет лишь 0.09 %, а значение FR – 0.02. (табл. 1, рис.2).

Что касается класса с осадками в диапазоне от 1045.32 до 1144.77 мм, то в данном интервале оползни совсем не зафиксированы, поэтому значение соотношения частот равно 0, что свидетельствует об отсутствии оползневой опасности при данных уровнях осадков (табл. 1, рис.2).

Таблица 1

Результаты анализа взаимосвязи между классами атмосферных осадков и проявлением оползней методом Frequency Ratio.

Фактор	Классы	Площадь проявления Оползня		Площадь класса		FR
		%	км^2	%	км^2	
Атмосферные осадки (мм)	647,51 - 746,96	6.42	3.3984	26.62	7001.7	0.24
	746,96 - 846,42	58.66	31.03	48.43	12736.3	1.21
	846,42 - 945,87	34.82	18.42	20.58	5412.37	1.69
	945,87 - 1045,32	0.09	0.0477	3.68	967.137	0.02
	1045,32 - 1144,77			0.69	182.517	0.00

Рис. 2. Графики зависимости соотношения частотности оползневых явлений от атмосферных осадков.

Выводы. На исследуемой территории в качестве основного фактора, влияющего на возникновение оползней, были выбраны атмосферные осадки. Для анализа взаимосвязи между оползнями и их причинными факторами использован метод соотношения частотности.

Результаты исследования показали, что наибольшая оползневая активность наблюдается в условиях среднего уровня атмосферных осадков, в пределах от 746.96 до 945.87 мм. В этих интервалах

зафиксированы как наибольшая площадь проявления оползней (до 58.66 %), так и высокие значения соотношения частот (FR до 1.69), что указывает на существенное влияние данного фактора на формирование оползней.

В противоположность этому, классы осадков ниже 746.96 мм и выше 945.87 мм характеризуются низкой или нулевой оползневой активностью. Низкие значения FR (от 0.24 до 0.00) и незначительная доля площади проявлений свидетельствуют о сниженной уязвимости территорий в этих диапазонах к оползневым процессам.

Таким образом, оптимальным индикатором риска возникновения оползней в Дарвазе и Западном Памире являются интервалы осадков в пределах 746.96-945.87 мм. Полученные данные носят прогнозный характер. Вместе с тем на развитие оползневых процессов влияет широкий спектр факторов, включая сейсмическую активность, гидрогеологические условия (уровень и режим подземных вод), геологическое строение и литологический состав пород, крутизну и экспозицию склонов, температурный режим, а также антропогенное воздействие (строительство, вырубка растительности, нарушение дренажных путей). При оценке восприимчивости территории к оползням атмосферные осадки, как правило, анализируются в совокупности с другими характерными для данной местности факторами.

Полученные результаты были достигнуты в рамках работы, проведённой в группе геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, что обеспечило применение современных методов анализа и интерпретации данных.

Поступило 30.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Джафарзаде Эсталх Кухи А. Факторы оползневой опасности в центральной части Эльбурсского хребта (на примере бассейна реки Сефидруд) – Вестник ВГУ. Серия: География, 2014, №1, с. 24-30.
2. Кезина Т. В., Трутнева Н. В. Методическое пособие по дисциплине «Геоморфология и четвертичная геология». Тема: «Экзогенные процессы рельефообразования на территории Амурской области. Оползни»: учебное пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2012, 58 с.
3. Оползни и сели: в 2 т. Т. 1. – М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1984, 351 с.
4. Panzeri L., Mondani M., Taddia G., Papini M., Longoni L. Analysis of snowmelt as a triggering factor for shallow landslide. – Geosciences, 2020, vol. 10, №3, Article 112. DOI: 10.3390/geosciences10030112.
5. Нарзиев Дж.М. Зависимость возникновения оползней от высотной зональности и экспозиции горных склонов Дарваза и Западного Памира. – Доклады Национальной академии наук Таджикистана, 2025, т. 68, №3, с. 292-300.
6. Wang Z., Zhang L. The effects of rainfall, soil type and slope on the processes and mechanisms of rainfall-induced shallow landslides. – Geotechnical Journal, 2018, vol. 55, №2, pp. 278-295. – DOI: 10.1016/j.geotech.2018.01.014.
7. Knapen A., Kitutu M.G. Topographic influence on landslides characteristics and implication for risk management in upper Manafwa catchment, Mt Elgon Uganda. – Natural Hazards, 2014, vol. 70, №3, pp. 1019-1033. DOI: 10.1007/s11069-013-0869-2.
8. Huang G., Zheng M., Peng J. Effect of Vegetation Roots on the Threshold of Slope Instability Induced by Rainfall and Runoff. – Geofluids, 2021, Article ID 6682113.

9. Handwerger A.L., Huang M.-H., Fielding E.J., Booth A.M., Bürgmann R. A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure. – Scientific Reports, 2019, vol. 9, №1. – DOI: 10.1038/s41598-018-38300-0.
10. Kumar A., Asthana A., Priyanka R.S., Jayangondaperumal R., Gupta A.K., Bhakuni S. Assessment of landslide hazards induced by extreme rainfall event in Jammu and Kashmir Himalaya, northwest India. – Geomorphology, 2017, vol. 284, pp. 72-87. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.01.003.
11. Ciervo F., Papa M.N., Mercogliano P. Current understanding and uncertainties associated with climate change and landslides. – Landslides, 2025, vol. 22, №3, pp. 345-359. – DOI: 10.1016/j.landslides.2025.01.011.
12. Hou F., Ni Z., Wang S., Sun H., Zhao F., Zhong W., Zhang Y. Study on soil and water loss on slope surface and slope stability under rainfall conditions. – Water, 2024, vol. 16, №24, pp. 3643. – DOI: 10.3390/w16243643.
13. Dai J., Zhang J., Zhang Z., Jia L., Xu H., Wang Y. Effect of flow rate and slope gradient on surface runoff and sediment yield under rill erosion. – Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, vol. 67, №6, pp. 849-861. – DOI: 10.1080/03650340.2020.1766676.
14. Mutti P.R., Dubreuil V., Bezerra B.G., Arvor D., de Oliveira C.P., Santos e Silva C.M. Assessment of Gridded CRU TS Data for Long-Term Climatic Water Balance Monitoring over the São Francisco Watershed, Brazil. – Atmosphere, 2020, vol. 11, №11, pp. 1207. – DOI: 10.3390/atmos11111207.
15. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – The CRU TS3.10 Dataset. – International Journal of Climatology, 2014, vol. 34, pp. 623-642.
16. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. – Scientific Data, 2020, vol. 7, pp. 1-18.
17. Ищук Н.Р. Объяснительная записка к карте ледниковых форм, селевых и оползневых явлений Таджикистана. – Душанбе, 2019, 80 с.
18. Ищук Н.Р., Ищук А.Р., Саидов М.С. Результаты использования космических снимков и ГИС при картировании оползней Таджикистана. – Наука и инновация, 2017, №2, с. 92-100.
19. Нарзиев Дж. М. Влияние крутизны и кривизны склона на образование оползней в Дарвазе и Западном Памире. – Вестник Филиала МГУ им. М.В.Ломоносова в г. Душанбе, 2024, т. 1, №3 (41), с. 135-144.

Дж.М.Нарзиев, М.Л.Лоикзода

ТАЪСИРИ БОРИШОТИ АТМОСФЕРӢ БА ПАЙДОИШИ ЯРЧҲО ДАР ДАРВОЗ ВА ПОМИРИ ҒАРБӢ

Академияи милии илмҳои Тоҷикистон,

Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИ Тоҷикистон

Дар мақола таъсири боришоти атмосферӣ ба ташаккули ярчҳо дар минтақаҳои кӯҳии Дарвоз ва Помири Ғарбӣ мавриди таҳқиқ қарор гирифтааст. Бо истифода аз ГИС технологияҳо харитаи тақсимоти боришот ва графикҳое таҳия гардиданд, ки вобастагии басомади ярчҳоро аз сатҳи боришот нишон медиҳанд.

Калимаҳои калидӣ: *ярч, омил, боришоти атмосферӣ, боришоти шадид, хокҳои гилин, барномаи ArcGIS, модели рақамии релеф.*

Dzh.M.Narziev, M.L.Loikzoda

THE IMPACT OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON LANDSLIDE OCCURRENCE IN DARVAZ AND THE WESTERN PAMIRS

National Academy Science of Tajikistan,

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, NAS of Tajikistan

The article examines the impact of atmospheric precipitation on the formation of landslides in the mountainous regions of Darvaz and the Western Pamirs. Using GIS technologies, a precipitation distribution map and graphs were created to show the correlation between landslide frequency and precipitation levels.

Key words: *landslide, factor, atmospheric precipitation, heavy rainfall, clay soils, ArcGIS software, digital elevation model.*

Сведения об авторах:

1. **Нарзиев Джамшед Мирхусенович** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии национальной академии наук Таджикистана, младший научный сотрудник. E-mail: jamshed13@mail.ru;
2. **Лоикзода Мустафо Лоик** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, ведущий научный сотрудник. E-mail: silver_05@mail.ru.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 544.3÷661.25
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

К.И.Изатуллозода, М.М.Тагоев, А.С.Курбонов[*],
академик НАН Таджикистана У.М.Мирсаидов

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ МАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ МЕТОДОМ СУЛЬФАТИЗАЦИИ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана,
[*]Агентство по химической, биологической радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана

Проведён термодинамический анализ протекания химических реакций, сопровождающих разложение железосодержащей руды Харангонского месторождения Таджикистана методом сульфатизации с использованием концентрированной серной кислоты. На основе термодинамических данных проведены расчёты термодинамических функций для предполагаемых реакций между основными минеральными компонентами руды. Показано, что большинство исследуемых реакций являются термодинамически допустимыми и могут протекать самопроизвольно. Установлено, что реакции с участием магнетита, эпидота и талька характеризуются отрицательными значениями ΔH° и ΔG°, что свидетельствует о преобладании энтальпийного фактора. В то же время реакции с пиритом и халькопиритом, несмотря на эндотермический характер, становятся термодинамически благоприятным при повышенных температурах за счёт положительного энтропийного фактора.

Ключевые слова: *термодинамические характеристики, разложение, серная кислота, энергия Гиббса, энтропия, энтальпия, сульфатизация.*

Одним из перспективных методов переработки железосодержащего сырья является его разложение с минеральными кислотами, в частности серной кислоты с образованием сульфидных форм целевых компонентов [1-4]. Однако успешная реализация таких процессов возможна только при наличии термодинамической обоснованности реакций между минералами составляющими руды и кислотой.

Целью настоящей работы является термодинамическая оценка протекающих реакций, при разложении магнетитовой руды концентрированной серной кислотой

Магнетитовая руда Харангонского месторождения имеет широкий спектр минералов (табл.1) В связи с этим представляет интерес термодинамическая оценка реакций между основными минералами этой руды и концентрированной серной кислотой с целью выявления условий их возможного протекания.

Адрес для корреспонденции: *Курбанов Амиршо Сохибназарович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/3, Агентство по химической, биологической радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана. E-mail: amirsho_77@mail.ru.*

Таблица 1

Содержание минералов в составе железной руде Харангонского месторождения Таджикистана

№	Наименование минералов	Содержание минералов в составе руды (масс%)
1	Магнетит – Fe_3O_4	64.2
2	Пирит – FeS_2	5.73
3	Халькопирит – (Cu, Fe) S_2	7.73
4	Магнезиохлоритоид – $(Mg)Al_2Si\ O_5(OH)_2$	1.8
5	Эпидот – $Ca_2Al_2\ Fe(SiO_4)_3OH$	2.4
6	Тальк – $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	1.16
7	Гипс – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2.07

При взаимодействии железосодержащего сырья с концентрированной серной кислотой могут протекать следующие предполагаемые химические реакции:

$$2Fe_3O_4 + 10H_2SO_4 = 3Fe_2(SO_4)_3 + SO_2\uparrow + 10H_2O \quad (1)$$

$$2FeS_2 + 14H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 15SO_2\uparrow + 14H_2O \quad (2)$$

$$2(CuFe)S_2 + 18H_2SO_4 = 2CuSO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + 17SO_2 + 18H_2O \quad (3)$$

$$2Ca_2Al_2Fe(SiO_4)_3OH + 13H_2SO_4 = 4CaSO_4 + 2Al_2(SO_4)_3 + Fe_2(SO_4)_3 + 6SiO_2 + 14H_2O \quad (4)$$

$$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 + 3H_2SO_4 = 3MgSO_4 + 4SiO_2 + 4H_2O \quad (5)$$

Для проведения практических расчётов термодинамических характеристик рассматриваемых реакций использованы табличные данные из справочной литературы [5, 6].

Значения стандартных термодинамических характеристик основных реагентов и продуктов реакций, участвующих в процессах сульфатизации железосодержащего сырья, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Термодинамические величины веществ

№	Вещество	ΔH°обр, кДж/моль	S°, Дж/моль. град
1	Fe_3O_4	-1111.68	146.18
2	FeS_2	-159.5	52.92
3	$(Cu,Fe)S_2$	-188.28	143.79
4	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	-5916.59	261.16
5	$Ca_2Al_2Fe(SiO_4)_3OH$	-6547.5	287.85
6	SiO_2	-905.40	43.5
7	H_2SO_4	-814.20	156.9
8	$Fe_2(SO_4)_3$	-2825.6	-563.9
9	$FeSO_4$	-998.09	-112.8
10	$Al_2(SO_4)_3$	-3792.33	-548.5
11	$CaSO_4$	-1454.06	-38.4
12	$MgSO_4$	-1379.04	-115.9
13	$CuSO_4$	-844.03	-74.7
14	SO_2	-296.8	248.06
15	H_2O	-285.84	70.08

На основе стандартных значений теплоты образования и энтропии участвующих в реакциях веществ (табл. 2), с использованием известных термодинамических уравнений были рассчитаны

изменения энтальпии, энтропии, а также энергии Гиббса для рассматриваемых реакций в стандартных условиях. Результаты расчётов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Термодинамические характеристика рассматриваемые реакции при стандартных условиях

№ реакции	$\Delta H°_{298}$, кДж/моль	$\Delta S°_{298}$, Дж/моль·град	$\Delta G°_{298}$, кДж/моль
1	-1266.64	-2604.2	-490.5884
2	438.44	1835.68	-108.59264
3	327.78	1653.38	-164.92724
4	-1981.06	-4168.9	-738.7278
5	-542.89	-905.56	-273.03312

Рассчитанные значения термодинамических характеристик для предполагаемых реакций между основными минералами магнетитовой руды Харангонского месторождения и концентрированной серной кислотой (табл. 3) позволяют провести обоснованный анализ термодинамической целесообразности данных процессов.

Реакции (1), (4) и (5) соответствующие взаимодействию серной кислоты с магнетитом, эпидотом и тальком характеризуются отрицательными значениями стандартной энтальпии и энергии Гиббса, что свидетельствует о самопроизвольном протекании процессов в стандартных условиях. В данных случаях преобладающим фактором, обеспечивающим термодинамическую выгодность реакций, является энтальпийный вклад. Это позволяет предположить, что указанные реакции могут эффективно протекать при сравнительно низких температурах, без необходимости дополнительного энергетического воздействия.

В то же время реакции (2) и (3) соответствующие взаимодействию серной кислоты с пиритом и халькопиритом, имеют положительные значения $\Delta H°$, что указывает на эндотермический характер процессов. Однако одновременно наблюдается значительный прирост энтропии, что при повышении температуры приводит к снижению энергии Гиббса и делает эти реакции термодинамически возможными при $T > 298$ К. Таким образом для реакций с участием сульфидных минералов основным термодинамическим фактором, обеспечивающим возможность их протекания, является энтропийный.

В табл. 4 представлены результаты расчёта изменения стандартной энергии Гиббса для рассматриваемых реакций в широком температурном диапазоне от 298 до 473К. Расчёт выполнен на основании уравнения:

$$\Delta G° = \Delta H° - T\Delta S°,$$

при условии, что $\Delta H°$ и $\Delta S°$ остаются неизменными в пределах указанного интервала температур. Такой подход позволяет оценить влияние температуры на термодинамическую вероятность протекания химических реакций сульфатизации, что имеет практическое значение для выбора оптимальных условий переработки железосодержащего сырья.

Таблица 4

Изменения величин энергии Гиббса ($\Delta G°_T$, кДж/моль) в зависимости от температуры процесса

№ реакция	$\Delta G°_{298}$	$\Delta G°_{323}$	$\Delta G°_{373}$	$\Delta G°_{423}$	$\Delta G°_{473}$
1	-490.588	-425.179	-295.273	-165.063	-34.853
2	-108.593	-154.485	-246.268	-338.052	-429.837
3	-164.927	-206.262	-288.93	-371.6	-454.27
4	-738.728	-634.505	-426.06	-217.615	-9.17
5	-273.033	-250.394	-205.116	-159.838	-114.56

Для наглядного представления температурной зависимости термодинамической устойчивости реакций построен график зависимости изменения энергия Гиббса от температуры (рис. 1). Анализ полученных кривых позволяет установить температурные пределы, в которых те или иные реакции становятся термодинамически благоприятными ($\Delta G° < 0$), а также оценить степень изменения энергетического потенциала системы с ростом температуры.

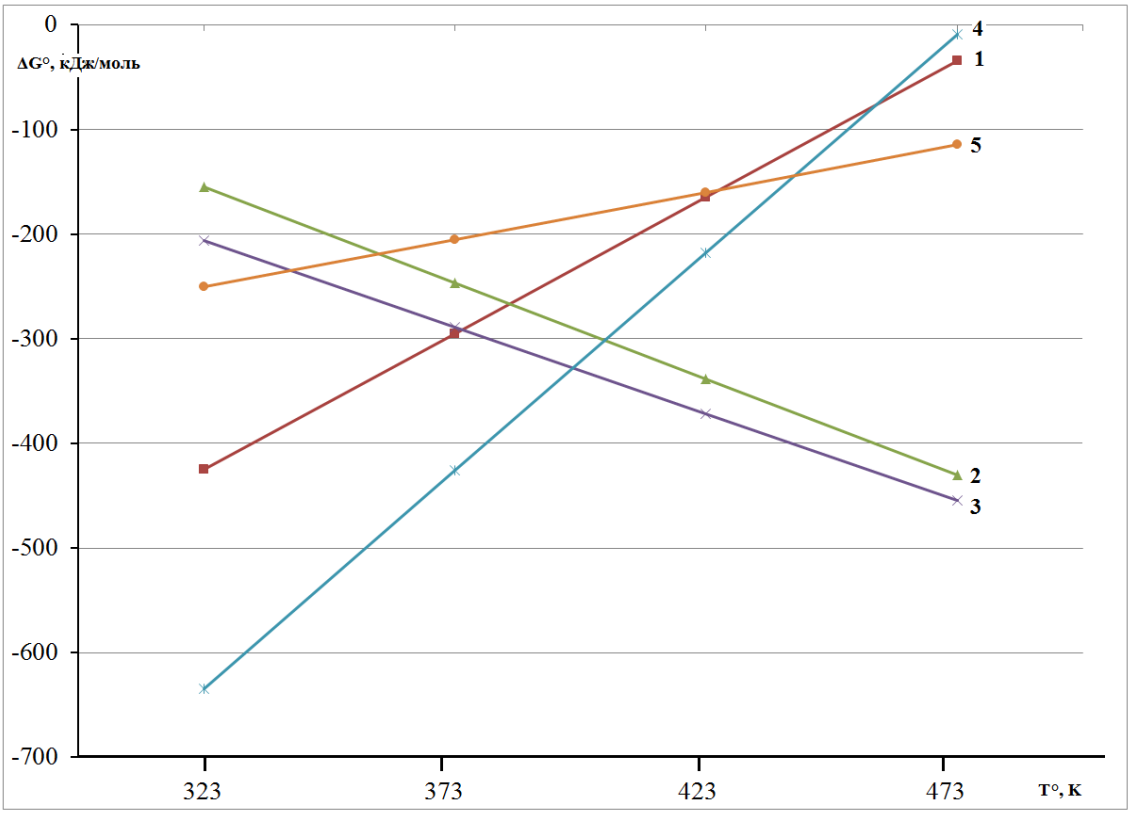


Рис. 1. Изменение значений ΔG реакций в зависимости от температуры (1 – магнетит, 2 – пирит, 3 – халькопирит, 4 – эпидот и 5 – тальк).

Анализ температурной зависимости энергии Гиббса (табл. 4 и рис. 1) подтверждает, что повышение температуры благоприятно сказывается на реакциях (2) и (3): значение $\Delta G°$ становится всё более отрицательным, что указывает усиление термодинамической склонности системы к протеканию данных процессов. Это особенно важно для реакции с пиритом: при температуре выше 373 К наблюдается значительное снижение $\Delta G°$, вплоть до -430 кДж/моль при 473 К. Следовательно, температурный режим процесса разложения оказывает существенное влияние на эффективность сульфатизации сульфидных компонентов.

В противоположность этому, для реакций (1), (4) и (5), сопровождающихся уменьшением энтропии системы, повышение температуры приводит к росту значения энергии Гиббса, и соответственно, к снижению термодинамической выгодности.

Из данных табл. 4 и рис. 1 видно, что повышение температуры процесса в реакциях (2) и (3) приводит к увеличению энтропийного вклада и росту отрицательного значения свободной энергии Гиббса, что в свою очередь способствует протеканию данных процессов. В частности, для реакции с магнетитом (1) при 473К значение ΔG° приближается к нулю, что указывает на предельные условия её самопроизвольного протекания. Аналогичная тенденция наблюдается для реакций с эпидотом и тальком.

Таким образом, выбор температурного режима процесса должен учитывать характер термодинамических факторов, определяющих направление реакций. Реакции с преобладанием энтальпийного вклада целесообразно проводить при умеренных температурах, тогда как сульфидные компоненты требуют более высоких температур для достижения термодинамической благоприятности.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что взаимодействие серной кислоты с минералами магнетитовой руды сопровождается термодинамически допустимыми реакциями в широком диапазоне температур. Это подтверждает перспективность сернокислотного метода переработки данного типа железосодержащего сырья как с энергетической, так и с технологической точки зрения.

Поступило 23.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Досаев С.М., Нематуллоев К.И., Курбонов А.С., Рахимов И.М., Мирсаидов У.М. Солянокислотное разложение исходной магнетитовой руды месторождения "Харангон" Таджикистана. – Доклады НАН Таджикистана, 2024, т. 67, №1-2, с. 76-80.
2. Нематуллоев К.И., Ашурзода Н.А., Курбонов А.С., Рахимов И.М., Мирсаидов У.М. Сернокислотное разложение магнетитовой руды месторождения Харангон Таджикистана. – Известия НАН Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим, геол и техн.н., 2023, № 3 (192), с 85-90.
3. Курбонов А.С., Нематуллоев К.И., Досаев С.М., Ашурзода Н.А., Рахимов И.М., Тагоев М.М. Поиск и оценка возможности переработки железосодержащих руд месторождения Харангон. – Известия НАН Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим, геол и техн.н., 2023, № 4 (193), с 90-94.
4. Нематуллоев К.И., Ашурзода Н.А., Курбонов А.С., Рахимов И.М., Мирсаидов У.М. Спекательный способ разложения магнетитовой руды месторождения Харангон Таджикистана. – Доклады НАН Таджикистана, 2023, т. 66, № 7-8, с 439-444.
5. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. Равделя А.А., Понаморевой А.М. – Л.: Химия, 1983, 232 с.
6. Рябин В. А., Остроумов М. А., Свит Т. Ф. Термодинамические свойства веществ. Справочник – Л.: Химия, 1977, 390 с.

Қ.И.Изатуллозода, М.М.Тағоев, А.С.Қурбонов*, У.М.Мирсаидов

БАҲОДИҲИИ ТЕРМОДИНАМИКИИ РАВАНДИ ТАҶЗИЯИ МАЪДАНИ МАГНЕТИТӢ БО УСУЛИ СУЛФАТИЗАТСИЯ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти кимиёи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон,
****Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон***

Таҳлили термодинамикии ҷараёни як қатор реаксияҳои химиявие, ки бо таҷзияи маъдани оҳандори кони Харангони Тоҷикистон, усули сулфатизатсия бо истифодаи кислотаи сулфати концентратшуда, анҷом дода шудааст. Дар асоси маълумоти термодинамикӣ функсияҳои термодинамикӣ барои як қатор реаксияҳои эҳтимолии байни компонентҳои минералии асосии маъдан ҳисоб карда шудааст. Нишон дода шудааст, ки аксари реаксияҳои мавриди таҳқиқ қарор дошта аз ҷиҳати термодинамикӣ имконияти худ аз худ ба амал омаданро доро мебошанд. Муайян карда шуд, ки реаксияҳои бо иштироки магнетит, эпидот ва талк бо бузургиҳои манфии $\Delta H°$ ва $\Delta G°$ тавсиф меёбанд, ки аз бартарии омили энталпӣ шаҳодат медиҳанд. Ҳамзамон, реаксияҳои бо иштироки пирит ва халкопирит, новобаста аз хусусияти эндотермии онҳо, дар ҳарорати баланд ба туфайли омили мусбати энтропӣ аз нигоҳи термодинамикӣ судманд мегарданд.

Калимаҳои калидӣ: *тавсифи термодинамикӣ, таҷзия, кислотаи сулфат, энергияи Гиббс, энтропия, энталпия, сулфатизатсия.*

K.I.Izatullozoda, M.M.Tagoev, A.S.Kurbonov*, U.M.Mirsaidov

THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF MAGNETITE ORE BY THE METHOD OF SULFATIZATION

National Academy of Sciences of Tajikistan,
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan,
****Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency, NAS of Tajikistan***

A thermodynamic analysis was carried out on a series of chemical reactions accompanying the decomposition of iron-containing ore from the Kharangon deposit in Tajikistan by the sulfatization method using concentrated sulfuric acid. Based on thermodynamic data, calculations of thermodynamic functions for a number of expected reactions between the main mineral components of the ore were carried out. It was shown that most of the reactions under study are thermodynamically permissible and can proceed spontaneously. It was found that reactions involving magnetite, epidote and talc are characterized by negative values of $\Delta H°$ and $\Delta G°$, which indicates the predominance of the enthalpy factor. At the same time, reactions with pyrite and chalcopyrite, despite their endothermic nature, become thermodynamically favorable at elevated temperatures due to the positive entropy factor.

Key words: *thermodynamic characteristics, decomposition, sulfuric acid, Gibbs energy, entropy, enthalpy, sulfatization.*

Сведения об авторах:

1. **Изатуллозода Камариддин Изатулло** – Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, докторант phD. E-mail: 909117111@mail.ru;
2. **Тагоев Муродбек Махмадалиевич** – кандидат химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник. E-mail: murodbek.tagoev@mail.ru;
3. **Курбонов Амиршо Сохибназарович** – доктор химических наук, Филиал Агентства по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана г.Бохтар, директор. E-mail: amirsho_77@mail.ru;
4. **Мирсаидов Улмас Мирсаидович** – доктор химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, главный научный сотрудник. E-mail: ulmas2005@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №8

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 544:536:622
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

З.С.Тураева, Ш.Х.Савзаева, И.М.Рахимов, М.М.Тагоев

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА СЕРНОКИСЛОТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРОДУКТОВ СПЕКАНИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ С ХЛОРИДОМ МАГНИЯ

Национальная академия наук Таджикистана,
Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана У.М.Мирсаидовым 02.07.2025 г.)

В статье рассматривается термодинамическая оценка процесса сернокислотного разложения спека, полученного из алюмосиликатного сырья (нефелинового сиенита) и хлорида магния. Проведены расчёты стандартных термодинамических параметров реакций взаимодействия компонентов спёка с серной кислотой. Рассмотрены изменения энергии Гиббса при температурах 298-373К. Установлены термодинамически возможные направления реакций и выявлены фазы, требующие модификации условий эффективного разложения.

Ключевые слова: *термодинамика, алюмосиликатное сырьё, серная кислота, спек, хлорид магния, сульфатное разложение.*

Алюмосиликатные породы, в частности нефелиновые сиениты, представляет собой ценное природное сырьё для получения алюминия, железа и кремния. Предварительное их спекание с хлоридом магния приводит к формированию легкорастворимых фаз. Для дальнейшего извлечения целевых компонентов применимы кислотные методы, в частности с использованием серной кислоты.

Одним из определяющих факторов эффективности переработки сырья является термодинамическая осуществимость ключевых реакций, что обусловливает актуальность термодинамического анализа процессов взаимодействия компонентов спека с серной кислотой.

Целью настоящей работы является термодинамическое обоснование возможности сернокислотного разложения продуктов спека алюмосиликатного сырья, предварительно обработанных хлоридом магния, на основе расчёта стандартных термодинамических функций и анализа их температурной зависимости.

Объектом исследования является, спек полученный при температурах 800-900°С из нефелинового сиенита Турпийского месторождения и $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. Согласно РФА состав спека включает: метасиликат магния – $MgSiO_3$, форстерит – Mg_2SiO_4, магниево-алюминиевая шпинель – $MgAl_2O_4$, MgO, Fe_2O_3, и остаточные силикаты и алюмосиликаты.

Адрес для корреспонденции: *Тураева Зулфия Саидовна. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул.Айни, 299/2, Институт химии НАН Таджикистана. E-mail: turaevazulfia927@gmail.com.*

Термодинамические данные (табл.1), полученные расчётом осуществлены по стандартным данным $\Delta H°_{298,}$ и $S°_{298}$ с использованием данных справочников [1-5].

Таблица 1

Термодинамические характеристики исходных веществ и продуктов реакций с серной кислотой [1-5].

№	Химическая формула	$\Delta H°_{298}$	$S°_{298}$
1	$MgAl_2O_4$	-2300	80
2	$MgSiO_3$	-1462	67
3	H_2SO_4	-745	17
4	$MgSO_4$	-1379	-115
5	H_2SiO_3	-1188	133
6	KCl	-408	82
7	K_2SO_4	-1433	175
8	HCl	-131	56
9	$AlCl_3$	-628	109
10	$Al_2(SO_4)_3$	-3792	-548
11	$MgSiO_4$	-2052	95
12	SiO_2	-910.9	42
13	H_2O	-286	70
14	Fe_2O_3	-824	87
15	$Al_2(SO_4)_3$	-3435	239
16	$CaCl_2$	-795	104
17	$CaCO_3$	-1207	88
18	MgO	-601	26
19	NaCl	-384	72
20	Na_2SO_4	-1384	149

Рассмотрены следующие реакции взаимодействия основных компонентов спека с серной кислотой:

$$MgSiO_3+H_2SO_4= MgSO_4+ H_2SiO_3, \quad (1)$$

$$2KCl + H_2SO_4= K_2SO_4+2HCl, \quad (2)$$

$$2Al\ Cl_3+ H_2SO_4=Al_2(SO_4)_3+6HCl, \quad (3)$$

$$MgSiO_4+2H_2SO_4=2MgSO_4+SiO_2+H_2O, \quad (4)$$

$$MgAl_2O_4+4H_2SO_4=MgSO_4+Al_2(SO_4)_3+4H_2O, \quad (5)$$

$$Fe_2O_3+3H_2SO_4=Fe_2(SO_4)_3+3H_2O, \quad (6)$$

$$CaCl_2+H_2SO_4=CaSO_4+2HCl, \quad (7)$$

$$MgO+H_2SO_4=MgSO_4+H_2O, \quad (8)$$

$$2NaCl+H_2SO_4=Na_2SO_4+2HCl. \quad (9)$$

Расчёт изменения энергии Гиббса проводился при комнатной температуры (298К) и в интервале температур 313-373К (табл. 2) по уравнению

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ.$$

Результаты расчётов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Значения рассчитанных термодинамических характеристик для химических реакций компонентов спека с H_2SO_4

Реакции	$\Delta H°_{298,}$ кДж/моль	$\Delta S°_{298,}$ Дж/моль·град	$\Delta G°_{298,}$ кДж/моль
1	-360	-66	-354
2	-134	-10	-133
3	-1087	67	-1092
4	-698	-177	-683
5	-1035	75	-1041
6	-624	-491	-584
7	-168	22	-169
8	-319	-88	-311
9	-133	100	-141

Таблица 3

Значения энергии Гиббса (ΔG, кДж/моль), рассчитанные в диапазоне Т=313-373К, при взаимодействии компонентов спека с H_2SO_4

Реакции	$\Delta G°_{313}$	$\Delta G°_{323}$	$\Delta G°_{333}$	$\Delta G°_{343}$	$\Delta G°_{353}$	$\Delta G°_{363}$	$\Delta G°_{373}$
1	-357.3	-356.7	-356.1	-355.3	-354.7	-354.1	-353.4
2	-133.6	-133.5	-133.4	-133.3	-133.2	-133.1	-133
3	-1089.6	-1090.3	-1091.1	-1091.6	-1092.3	-1093.1	-1093.7
4	-690.9	-689.1	-687.3	-685.6	-683.8	-682.1	-680.3
5	-1038.1	-1038.7	-1039.5	-1040.2	-1041.1	-1041.8	-1042.5
6	-340.1	-335.4	-330.5	-325.6	-320.7	-315.8	-310.9
7	-168.8	-169.1	-169.3	-169.5	-169.7	-169.9	-170.2
8	-315.4	-313.6	-313.7	-312.8	-311.9	-311.8	-310.2
9	-137	-138	-139	-140	-141	-142	-143

На рис.1 приведены зависимость изменения ΔG от температуры.

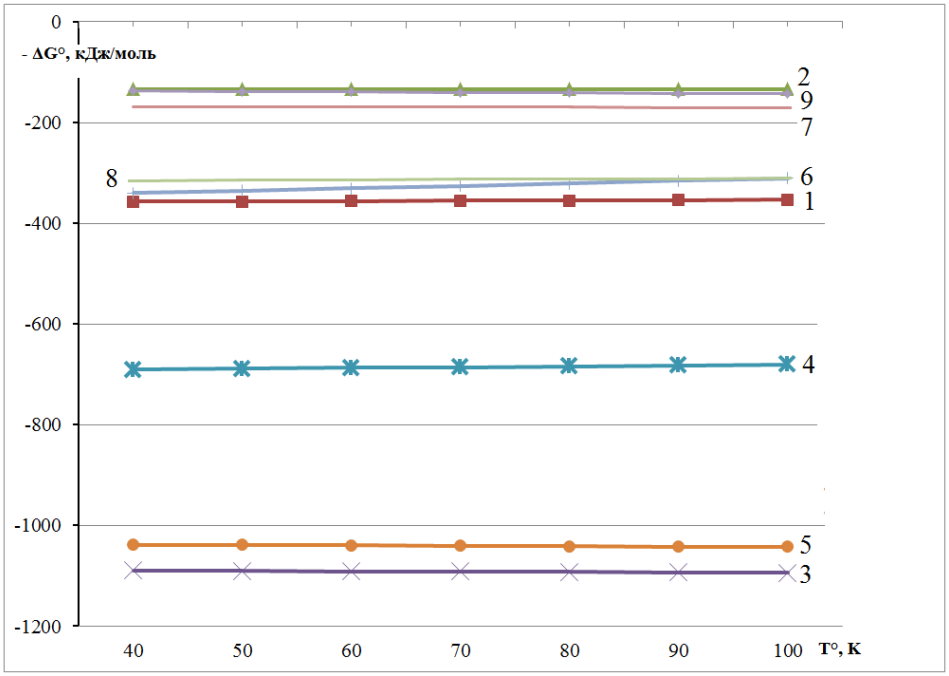


Рис. 1. Влияние температуры на изменение величин ΔG при разложении компонентов спека с H_2SO_4.

Все рассмотренные реакции характеризуются отрицательными значениями ΔG°, что свидетельствует о термодинамической возможности протекания процессов при температурах до 373К. Особенно выгодны реакции взаимодействия оксида магния и железа (III) с серной кислотой. Реакция $MgAl_2O_4$ с H_2SO_4 также термодинамически благоприятна, что отличает её от аналогичной реакции с соляной кислотой, где ΔG° был положительным. Это объясняется более высокой комплексообразующей способностью сульфат-ионов и большей экзотермичностью гидратации Al^{3+}.

Проведённая термодинамическая оценка показала, что взаимодействие основных фаз спека с серной кислотой является термодинамически осуществимым процессом.

Все реакции компонентов спека с H_2SO_4 протекают с образованием стабильных сульфатов, кремнезёма, хлороводорода и воды.

Результаты подтверждают целесообразность использования H_2SO_4 для эффективного разложения спека, полученного из алюмосиликатного сырья и $MgCl_2$ при температурах до 100°С.

Поступило 02.07.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. – М.: Химия, 1975, 487 с.
2. Нечаев В.В., Елманов Г.Н. Термодинамические расчеты металлургических процессов. Учебное пособие. – МИФИ, 2001 г., 67 с.
3. Гурвич Л.В., Медведев В.А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х т. – М.: Наука, 1978 –1982.
4. Stull D.R., Prophet H., JANAF Thermochemical Tables. – Washington: US Dept. of Commerce, 1971-1982.
5. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии. Справочник. – М.: Металлургия, 1985.

З.С.Тураева, Ш.Х.Савзаева, И.М.Рахимов, М.М.Тагоев

БАҲОДИҲИИ ТЕРМОДИНАМИКИИ РАВАНДИ ТАҶЗИЯИ КИСЛОТГИИ ГУДОХТАИ МАЪДАНИ АЛЮМОСИЛИКАТӢ БО ХЛОРИДИ МАГНИЙ БО КИСЛОТАИ СУЛФАТ

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
Институти кимиёи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон

Дар мақола баҳодиҳии термодинамикии раванди таҷзияи кислотагии сулфатӣ, маҳсулоти гудохта, ки аз маъдани алюмосиликатӣ (сиенити нефелинӣ) ва хлориди магний ба даст оварда шудааст, баррасӣ мегардад. Параметрҳои стандартии термодинамикии реаксияҳои боҳамтаъсиркунии мутақобилаи компонентҳои маъдан бо кислотаи сулфат гузаронида шуда, ҳисоб карда шудааст. Тағйирёбии энергияи Гиббс дар ҳароратҳои 298-373 К омухта шудааст. Имконпазирии реаксияхо аз ҷихати термодинамикӣ муқаррар карда шуда, фазаҳое ки тағйир додани шароити самарабахшро талаб мекунанд, муайян карда шудаанд.

Калимаҳои калидӣ: *термодинамика, ашёи хоми алюмосиликатӣ, кислотаи сулфат, гудохтан, хлориди магний, таҷзияи сулфатӣ*

Z.S.Turaeva, Sh.Kh.Savzaeva, I.M.Rakhimov, M.M.Tagoev

THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF THE PROCESS OF SULFURIC ACID DECOMPOSITION OF SINTERING PRODUCTS OF ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS WITH MAGNESIUM CHLORIDE

National Academy of Sciences of Tajikistan,
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan

The article considers the thermodynamic assessment of the process of sulfuric acid decomposition of sinter obtained from aluminosilicate raw materials (nepheline syenite) and magnesium chloride. Calculations of standard thermodynamic parameters of reactions of interaction of sinter components with sulfuric acid are carried out. Changes in Gibbs energy at a temperature of 298-373K are considered. Thermodynamically possible directions of reactions are established and phases requiring modification of conditions for effective decomposition are identified.

Key words: *thermodynamics, aluminosilicate raw materials, sulfuric acid, sinter, magnesium chloride, sulfate decomposition*

Сведения об авторах:

1. **Тураева Зулфия Саидовна** – соискатель, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: turaevazulfia927@gmail.com;
2. **Савзаева Шабнам Хушвахтовна** – соискатель, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана. E-mail: sabzaeva1985@mail.ru;
3. **Рахимов Илхомиддин Мирзоевич** – кандидат технических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, заведующий лабораторией комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов. E-mail: rahimzod_74@mail.ru;
4. **Тагоев Муродбек Махмадалиевич** – кандидат химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник. E-mail: murodbek.tagoev@mail.ru.

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
2025, том 68, №8

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 546.72: 547.781.1
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

С.Г.Ёрмамадова, И.У.Камолзода, У.Р.Раджабов*

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗА(II) С 1-МЕТИЛ-2-МЕРКАПТОИМИДАЗОЛОМ МЕТОДОМ ОКСРЕДМЕТРИИ

Таджикский национальный университет,
****Таджикский государственный медицинский университет им. Абуали ибни Сино***
(Представлено академиком НАН Таджикистана Дж.Х.Халиковым 02.07.2025 г.)

Методом оксредметрии изучен процесс комплексообразования железа (II) с 1-метил-2-меркаптоимидазолом в растворе. С помощью этого метода были определены константы комплексных частиц, а также диапазон pH и максимальных образования этих частиц.

Ключевые слова: *комплексообразование, железо, 1-метил-2-меркаптоимидазолом, константа устойчивости, ионная сила, окислительная функция, диаграмма распределения, области доминирования.*

Производные имидазола занимают значительное место в современной медицинской химии. В научной литературе представлены данные о способности d-металлов к комплексообразованию с производными имидазольного ряда. Установлены как составы, так и стабильность образующихся комплексов с самим имидазолом и его различными производными.

Железо играет ключевую роль в поддержании адекватной иммунной функции организма. Его присутствие необходимо для полноценного осуществления процессов фагоцитоза, нормальной активности естественных киллерных клеток, а также для синтеза таких биологически активных веществ, как лизоцим и интерферон, обеспечивающих высокую бактерицидную активность сыворотки крови. Кроме того, железо входит в состав ряда антиоксидантных ферментов, включая пероксидазы, что обусловливает его выраженные антиоксидантные свойства. Комплексные соединения железа (II) находят широкое применение в фармацевтической практике.

Как известно, железо относится к числу жизненно необходимых микроэлементов, и его дефицит в организме может вызывать развитие различных патологических состояний. Недостаток железа, как правило, компенсируется посредством сбалансированного питания, включающего продукты, богатые данным элементом [1].

Целью настоящего исследования является изучение процессов комплексообразования ионов железа(II) с 1-метил-2-меркаптоимидазолом при температуре 308 К и ионной силе раствора 0,25 моль/л методом окислительно-восстановительной (редокс) потенциометрии.

Адрес для корреспонденции: *Ёрмамадова Саврибегим Гулмамадовна. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17. E-mail: ermamadova2015@mail.ru.*

Экспериментальная часть

Методом окислительно-восстановительной потенциометрии Кларка–Никольского исследовано образование комплексов в системе Fe(II)–мерказолил–H_2O. Данный метод основан на зависимости электродвижущей силы (ЭДС) или окислительного потенциала от концентрационных параметров, таких как pH, активность ионов Fe(II) и концентрация лиганда (pCL) [2–4]. Для получения количественных данных использовался pH-метр и иономер МИ-150 с погрешностью измерения ±0,1 мВ. Измерение окислительного потенциала в гальванических цепях переноса осуществлялось с помощью железного, хлорсеребряного и стеклянного электродов. Железный и хлорсеребряный электроды применялись для регистрации окислительно-восстановительного потенциала системы, а стеклянный электрод — для контроля pH раствора. Второй гальванический элемент обеспечивал непрерывное определение pH раствора в электрохимической ячейке в процессе титрования.

Для проведения эксперимента готовился рабочий раствор, содержащий 1-метил-2-меркаптоимидазол концентрации $1\cdot10^{-2}$ моль/л и сульфат железа (II) концентрации $1\cdot10^{-4}$ моль/л. Для создания кислой среды использовалась 0.1 М серная кислота, а ионная сила поддерживалась 0,9 М раствором Na_2SO_4. Рабочий раствор подвергался титрованию 0,1 н раствором гидроксида натрия. В случае корректного функционирования железного электрода, он должен был следовать уравнению Нернста. Экспериментально установлено, что при pH ≥ 6,0 ионы Fe(II) начинают подвергаться гидролизу, поэтому измерения ЭДС проводились с жестким контролем pH и ионной силы раствора.

Для определения области образования комплексных соединений и предварительного состава комплексных частиц выполнялись измерения окислительно-восстановительного потенциала гальванического элемента по соответствующему уравнению:

$$\varphi_{Fe(II)Fe(0)} = E - \varphi_{Ag/AgCiCi^-} \quad (1)$$

где E – электродвижущая сила (ЭДС) электрохимической цепи; $\varphi_{Fe(II)/Fe(0)}$ – окислительно-восстановительный потенциал железного электрода; $\varphi_{Ag/(AgCl/Cl^-)}$ – сравнительный потенциал хлорсеребряного электрода.

На первоначальном этапе исследования проверяли чистоту исходных веществ с использованием нескольких методик. Одним из показателей чистоты служило измерение температуры плавления. Для дополнительного подтверждения чистоты лиганда применялся метод хроматографии.

В рамках хроматографического анализа мерказолил растворяли в заданном объёме воды, затем с помощью капилляра наносили точку на нижнюю часть хроматографической бумаги. Полученную пластинку помещали вертикально в камеру, заполненную до уровня 5 мл разделительной смесью, состоящей из бутанола, уксусной кислоты и воды. Пока фронт растворителя не достиг заданной отметки на бумаге, пластинку удерживали в камере. По завершении процесса разделения пластинку извлекали и сушили при комнатной температуре. В результате на фильтровальной бумаге обнаруживалось только одно пятно, что служит свидетельством высокой степени чистоты исследуемого лиганда.

.

Результаты и их обсуждение

Для определения условий формирования комплексных соединений в зависимости от значения pH раствора применяют оксредметрический метод. Количество лигандов, входящих в состав комплекса, рассчитывается на основе угла наклона зависимости электрохимического потенциала от pH. Анализ зависимости окислительного потенциала от концентрации ионов водорода позволяет выявить особенности протекания реакции комплексообразования, а также определить преобладающие формы комплексов Fe(II) и Zn(II) с 1-метил-2-меркаптамидазолом (см. рис. 1).

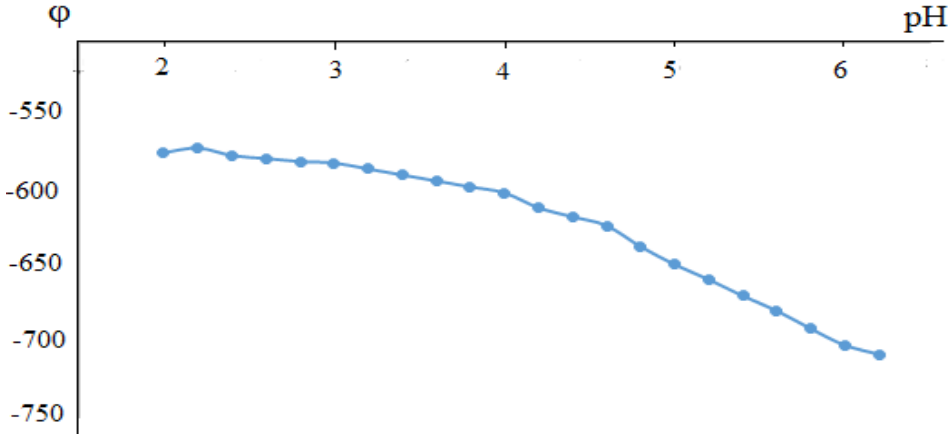


Рис. 1. Доминирование комплексов в системе железа(II)–Мерк–вода по зависимости (φ) от pH: 308 K и ионной силе 0.25 моль/л; $C_L = 1 \cdot 10^{-2}$ и $C_{Fe(II)} = 1 \cdot 10^{-2}$ моль/л.

На основе полученных экспериментальных зависимостей в интервале pH от 2.0 до 6.4 установлено, что потенциал системы снижается от -570 до -720 мВ, что свидетельствует о протекании процесса комплексообразования и формировании отдельных комплексных частиц.

Как видно из рисунка 1, при увеличении концентрации металла-комплексообразователя и росте pH раствора окислительный потенциал системы уменьшается.

Последовательное образование линейных участков с углами наклона, равными 0, -ν/2 и -ν, согласно теории метода усреднения, подтверждает ступенчатый характер комплексообразования металла с органическим лигандом. Горизонтальный участок зависимости потенциала (φ) от pH системы Fe(II)–мерказолил–H_2O (рисунок 2, при pH ≤ 2,0) указывает на отсутствие комплексообразования в кислой среде. При pH > 2.2 наблюдается монотонное снижение окислительного потенциала, что свидетельствует о формировании комплексов железа(II) с мерказолилом. Анализ зависимости φ от pH позволяет уточнить общее число координированных лигандов, связанных с металлом-комплексообразователем.

Для определения числа координированных ионов металла и лигандов были сняты зависимости окислительного потенциала от концентраций железа и лиганда, которые также характеризуются определёнными углами наклона, указывающими на присоединение одного иона металла и одного лиганда. Сопоставление этих данных с уравнением (1) позволяет заключить, что в исследуемой системе образуются моноядерные комплексные частицы.

На основании анализа наклонов всех экспериментальных кривых была составлена стехиометрическая матрица (см. таблицу 1).

Таблица 1

Стехиометрическая (математическая) модель системы Fe(II) – мерказолил – вода

№, п/п	pH	Тангенсы углов наклона зависимостей			Состав комплексов
		φ – pH	φ - pCFe(II)	φ - pCL	
1	2,0 - 2,6	0	0	0	$[Fe(H_2O)_4]^{2+}$
2	2,5 - 4,8	-ν	-ν/2	ν/2,	$[FeHL(H_2O)_5]^{2+}$
3	3,2 - 6,2	-2ν	-ν/2	ν/2	$[FeHL(OH)(H_2O)_4]^{+}$
4	2,2 - 5,6	-ν	-ν/2	ν/2	$[FeL(H_2O)_4]^{+}$
5	4,0 - 6,4	-2ν	-ν/2	ν	$[FeL_2 (H_2O)_2]^{0}$

Для проведения расчётов равновесий с высокой точностью и в короткие сроки была разработана химическая модель равновесий, учитывающая все основные виды частиц, присутствующих в системе. Эта модель представлена в таблице 2.

Таблица 2

Стехиометрическая (математическая) модель системы железо(II) – мерказолил – вода, а также константы образования комплексных соединений при температуре 308 К и ионной силе раствора 0.25 моль/л.

№ , n/n	Fe (II)	H	L	OH	Состав комплекса	lg β q.s.l.k
	q	s	l	k		
Констант протонизации лиганд					$HL \leftrightarrow H^+ + L^-$	lgKa
Гидролизная форма					$FeOH^+$	K_{1001}
1	1	1	1	1	$[FeHLOH]^+$	β_{1111}
2	1	1	1	0	$[FeHL]^{2+}$	β_{1110}
3	1	0	2	0	$[FeL_2]^0$	β_{1020}
4	1	0	1	0	$[FeL]^+$	β_{1010}

Анализ химической модели реакции показывает, что железо образует четыре различных моноядерных комплекса. На основании оксредметрических данных и предполагаемого состава комплексов исследуемой системы была построена стехиометрическая матрица. Как видно из таблицы 2, в системе Fe(II)–Мерказолил–H_2O наряду с комплексными частицами присутствует гидроксоформа двухвалентного железа. Кроме того, в таблице приведено значение константы протонирования лиганда.

Теоретическая функция окисления применялась для расчёта равновесия в системе, а также для определения постоянных устойчивости образующихся комплексов:

$$f_m^0 = h^5 / \left(h^5 + \beta_{1010}K_aC_ah^4 + \beta_{1020}K_a^2C_a^2h^3 + \beta_{0110}K_aC_ah^3 + \beta_{1011}h^3 + \right.$$
$$\left. + \beta_{1110}K_aC_ah^3 + \beta_{1111}K_aC_a + \beta_{1001}h^2\right) \qquad (2)$$

В уравнении (2) $\beta_{1010}KaCah^4$–$[FeL(H_2O)_3]^+$; $\beta_{1020}Ka^2Ca^2h^3$-$[FeL_2(H_2O)_2]^0$; $\beta_{1011}KaCah^3$-$[FeLOH(H_2O)_2]0$; $\beta_{1110}KaCah^3$ - $[FeHL(H_2O)_3]^{2+}$; $\beta_{1111}KaCah^2$ - $FeHLOH(H_2O)_2]^+$;. [5].

Экспериментальная функция окисления рассчитана:

$$f_э^0 = C_г / C_0 \exp\left(\varphi - \varphi^0\right) n / \nu \qquad (3)$$

с учетом уравнений (2) и (3) и позволяют графически представить зависимость окислительной функции lgfэ,т от pH раствора и показано на рис.5

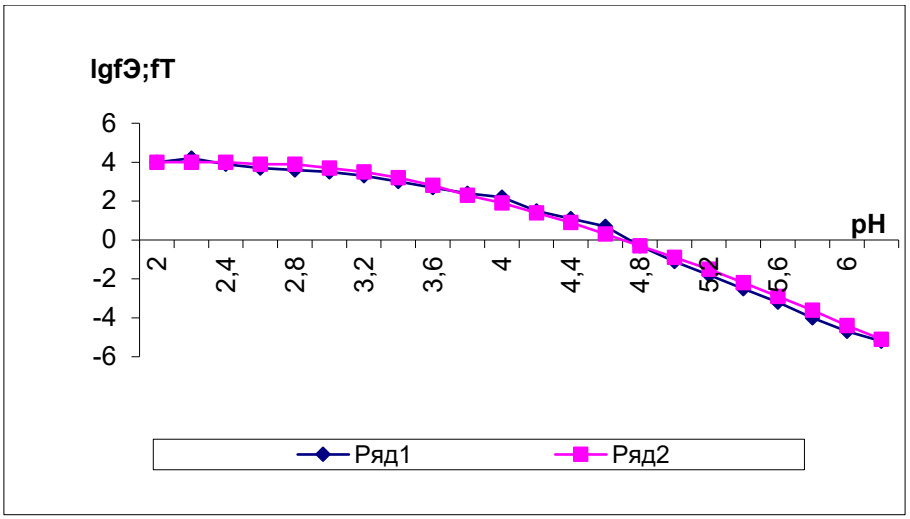


Рис. 5. Значений экспериментальной функции – fe (1) и теоретической – ft (2) от pH.

Диаграммы распределения комплексных соединений железа(II), согласно которым координация моноядерных комплексных соединений в широком диапазоне pH до 100% позволяет без труда их синтезировать. Как видно из диаграммы распределения, максимальная доля частиц FeL и FeL_2 составляет от 80% до 90%

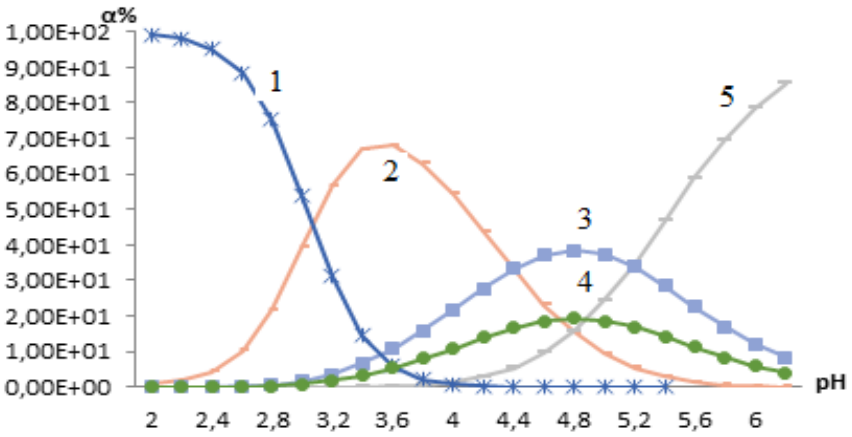


Рис. 6. Диаграмма распределения ионов и комплексных частиц железа с мерказолилом: 1 – $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$; 2 – $[FeHМерк(H_2O)_5]^{2+}$; 3 – $[FeМерк\ (H_2O)_4]^{+}$; 4 – $[FeHМерк(H_2O)_3OH]0$; 5 – $[Fe(Мерк)_2(H_2O)_2]^{0}$. T=308 K, I= 0.25 моль/л

Степень накопления, состав и константы устойчивости образующихся комплексных частиц железа (II) с мерказолилом были уточнены с использованием окислительной функции Юсуфова З.Н. и итерационного метода. Константы устойчивости комплексов определялись при четырёх различных значениях ионной силы раствора. Наблюдается снижение значений констант образования комплексов с увеличением ионной силы, что объясняется усилением взаимодействий между ионами раствора и процессами сольватации.

В таблице 2. 4 приведены значения констант устойчивости полученных комплексов Fe(II), рассчитанные по методу, предложенному в [6].

Таблица 2

Значения констант устойчивости мерказолинатных координационных соединений Fe(II) при температуре 308.15 К.

I, моль/л	Константы устойчивости комплексов, $\beta_{q.s.l.к}$			
	FeL	FeHL	FeL_2	FeHLOH
0.25	0.08±0.12	4.17±-0.17	5.71±-0.18	-2.52± 0.07

Из данных таблицы видно, что с увеличением числа лигандов в комплексных соединениях константы устойчивости возрастают, особенно для анионной формы лиганда — мерказолил-бидентанта. При переходе от комплексов $[FeHМерк(H_2O)_4]^{2+}$ и $[FeHМерк(H_2O)_4OH]^{+}$ к соединениям $[FeМерк(H_2O)_4]^{+}$ и $[Fe(Мерк)_2(H_2O)_2]^{0}$ наблюдается значительное повышение устойчивости последних. Этот экспериментальный факт объясняется тем, что в координационных соединениях атом серы находится в тионной форме, при этом железо с мерказолилом образует монодентатный комплекс.

В комплексах состава $[FeМерк(H_2O)_4]^{+}$ и $[Fe(Мерк)_2(H_2O)_2]^{0}$ происходит переход атомов серы из тионной в тиольную форму, а пиридиновый атом азота протонируется при pH ≈ 5,0, высвобождая пиридиновый азот. В результате мерказолил выступает как бидентатный лиганд, что ведёт к образованию хелатных комплексов, устойчивость которых значительно выше, чем у монодентатных.

Концентрации свободных ионов железа в аквакомплексе и связанных в моноядерный комплекс определялись методом итераций (последовательного приближения), что позволило рассчитать степени накопления (мольные доли) свободных и комплексных форм.

Таким образом, проведённые исследования с использованием метода оксредметрии позволили определить состав новых координационных соединений, а также константы образования и области доминирования комплексов железа(II) с мерказолилом и гидроксид-ионов при помощи окислительной функции. С помощью этой же функции были выявлены термодинамические условия синтеза двуядерного мерказолилатного комплекса железа(II), обладающего максимальным значением константы устойчивости.

Установлено, что при ионной силе 0.25 моль/л Na_2SO_4, температуре 308 К, концентрациях $C_{Fe(II)} = 1\cdot10^{-4}$ моль/л и $C_{(Мерк)} = 1\cdot10^{-2}$ моль/л в растворе присутствуют следующие комплексные частицы: FeHL, FeHLOH, FeL, FeL_2.

Поступило 02.07.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Камолова И.У. Зависимость процессов комплексообразования железа(II) с мерказолилом от ионной силы раствора. – Изв. АН РТ, 2023, №1(190), с.72-78.
2. Ёрмамадова С.Г., Раджабов У.Р., Камолова И.У. Комплексообразование железа(II) с мерказолилом при температуре 298 К и ионной силе 1.0 моль/л. – ДАН РТ, 2021, т. 64, №11-12, с.694-700.
3. Рахимова М.М., Файзуллозода Э.Ф., Давлатшоева Дж.А., Маметова А.С. Теоретические основы метода окислительного потенциала Кларка- Никольского. – Душанбе: ЭР-граф, 2020, 312 с.

4. Ёрмамадова С.Г., Камолова И.У., Раджабов У. Комплексообразования Fe(II) – мерказолил – H2O методом оксредметрии. – Всероссийская школа – конференция молодых ученых «ДНИ НАУКИ В ИГХТУ» (24-28 апреля 2023 года). – Иваново, 2023, с.124-126.
5. Юсупов З.Н. Новый способ определения состава и констант образования комплексов в окислительно-восстановительных системах. – Тез. докл. науч.-теор. конф. «Современные проблемы физики конденсированных сред», посвящ. памяти заслуженного деятеля науки Таджикистана, профессора Нарзуллоева Б.Н., 45 мая 2007г. – Душанбе: ЭР-граф, 2007, с. 91-97.

С.Г.Ёрмамадова, И.У.Камолзода, У.Р.Рачабов*

КОМПЛЕКСҲОСИЛКУНИИ ОҲАН(II) БО 1-МЕТИЛ-2-МЕРКАПТОИМИДАЗОЛ БО УСУЛИ ОКСРЕДМЕТРӢ

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон,

Донишгоҳи давлатии тиббии ба номи Абуали ибни Сино

Бо усули оксредметрия процесси комплексии ҳосилшавии оҳан (II) бо 1-метил-2-меркаптомидазол дар махлул омӯхта шуд. Бо истифода аз ин усул константаҳои заррачаҳои ҳосилшуда, инчунин диапазони pH ва хосилшавии максималии ин хиссачахо муайян карда шуданд.

Калимаҳои калидӣ: *комплекссозӣ, оҳан, 1-метил-2-меркаптомидазол, константа устуворӣ, қувваи ионӣ, функсияи оксидшавӣ, диаграммаи тақсимот, минтақаҳои доминантӣ.*

S.G.Jormamadova, I.U.Kamolzoda, U.R.Rajabov*

IRON(II) COMPLEXATION WITH 1-METHYL-2-MERCAPTOIMIDAZOLE BY OXYDMETRY

Tajik National University,

Avicenna Tajik State Medical University

The process of iron(II) complexation with 1-methyl-2-mercaptoimidazole in solution was studied by oxydmetry. Using this method, the constants of complex particles, as well as the pH range and maximum formation of these particles were determined.

Key words: *complexation, iron, 1-methyl-2-mercaptoimidazole, stability constant, ionic strength, oxidation function, distribution diagram, dominance regions.*

Сведения об авторах:

1. **Ёрмамадова Саврибегим Гулмамадовна** – Таджикский национальный университет, доцент кафедры прикладной химии. E-mail: ermamadova2015@mail.ru;
2. **Камолова Иклима Усмоновна** – доктор Ph.D, Таджикский национальный университет. E-mail: iklima.kamolova.94@mail.ru;
3. **Раджабов Умарали** – доктор химических наук, Таджикский государственный медицинский университет им. Абуали ибн Сино, профессор кафедры фармацевтической и токсикологической химии. E-mail: umarali55@mail.ru.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 66.087.97
Специальность: 1.4.4. Физическая химия

А.Ш.Мурodиён, А.Г.Сафаров, Б.С.Джамолзода

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСМОТИЧЕСКОЙ И ДИФФУЗИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ИОНИТОВЫХ МЕМБРАН МА-40 И МК-40 В ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Национальная академия наук Таджикистана,
Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАН Таджикистана

(Представлено членом-корреспондентом НАН Таджикистана А.Бадаловым 23.06.2025 г.)

Приводятся результаты исследования осмотической и диффузионной проницаемость ионных мембран МА-40 и МК-40 в однокомпонентных водных растворах электролитов NaCl, $CaCl_2$, $CuCl_2$ и $MgCl_2$ различной концентрации. Приведены изменения коэффициентов осмотической ($\beta_{осм.}$) и диффузионной ($\beta_{диф.}$) проницаемости мембран от количества циклов обработки и показаны прямолинейной зависимости $\beta_{диф.}$ и $\beta_{осм.}$ от концентрации растворов электролитов. Определены оптимальное время набухания мембран, что составляет от 5 до 6 часов. Полученная линейная зависимости $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф.}$ мембран в исследованных растворах имеет вида $\beta_{осм} \cdot \beta_{диф} = a + вс$, где а и в эмпирические константы. Константы (а) и (в) рассчитались по способу наименьших квадратов. Таким образом, полученные значения $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ в исследованных водных растворах электролитов дают основания для правильного выбора метода опреснения воды, содержащих ионов Cu^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}.

Ключевые слова: *мембрана, осмос, диффузия, проницаемость, электролит, электродиализ, обессоливания, ионный обмен, концентрат.*

В в е д е н и е

Различают хозяйственно-питьевых, коммунальных и промышленных вод. Промышленные предприятия, особенно горнообогатительные, химические, металлургические выбрасывают огромного количества химически-загрязненных стоков, что вызывает экологическую опасность. Химически-загрязненные стоки не обрабатываются, а выбрасываются в хвостохранилищах или шламовых полях, которые приводит к потери воды. Это обстоятельство противоречит принятой Правительством нашей Республики Международной Программы «Вода для устойчивого развития» в период 2018-2028 гг.

Для очистки вод хозпитьевого, коммунального и промышленного назначения используют различные способы: дистилляция, фильтрация и обессоливания. К водам коммунального назначения можно относятся бытовые (для стирки, купания, сельское хозяйство, дренажные воды). Для очистки химически загрязнённых промстоков используют различные опреснительные установки, а также активированные угли (сорбенты). К опреснению можно отнести осмос, обратный осмос

Адрес для корреспонденции: *Мурodиён Асрор Шариф. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул.Айни, 299/1, Физико-технический институт НАН Таджикистана. E-mail: murodiyona@talco-s.tj.*

(гиперфильтрации), диализ, электродиализ, электролиз, ионный обмен (в виде гранул или мембран-анионитовые и катионитовые) [1-6].

Для асуществления технологического процесса, а также работы паровых котлов, применяемая вода не должна содержать соли, а также посторонние анионы и катионы, ухудшающие работоспособности оборудования и загрязняющие конечных получаемых продуктов. Особенно жесткие требования к чистоте воды (обессоленная) предъявляются в энергосистеме при производстве пара с целью выработки электроэнергии. Например, в ООО «ТАЛКО Кемикал» предусмотрена выработки электроэнергии мощностью 3 МВт за счет пара получаемого при утилизации тепла, образующегося при сжигании серы в производстве серной кислоты.

Бурное развитие сельского хозяйства и промышленности, расширение орошаемого земледелия ежегодно увеличивают потребность в опресненной воде. Так. суммарная мощность всех типов опреснительных установок в мире к 1981 г. возросла в 6 раз. Предполагается что к 2030 г. мощность опреснительных установок достигает более 100 млн. $м^3$/сутки. Наиболее распространение опреснение получило на Среднем Востоке, особенно в Саудовские Аравии производят более 3.0 млн. $м^3$/сутки пресной воды. Далее в Арабской Республике Египет. Израиле, США. Голландии. Ливии, стран СНГ и др. [1-6].

В зависимости от солесодержания воды классифицируют на пресные до 1 г/л слабосолоноватые – 1-3; солоноватые – 3-5; сильно солоноватые – 5-10; соленые – 10-25; сильносоленые – 25-50; рассолы выше 50 г/л. В связи с этим применяют различные методы опреснения воды: дистилляция, ионный обмен, электродиализ, обратный осмос вымораживания и др. [7-9].

При выборе метода опреснения в зависимости от степени минерализации исходной воды можно пользоваться данными [10] и требованиями, изложенными в СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение».

Следует отметить, что до 1985 г. во всем мире насчитывалось 4600 опреснительных установок (ОУ) производительностью более 95 $м^3$/сутки разных типов которые имели суммарную мощность 9.92 млн. $м^3$/сутки и ежегодно вырабатывали 3.62 $км^3$ опресненной воды. В настоящее время преобладающую роль принадлежит дистилляционным опреснителям, на долю которых приходится 67% общей производственной мощности. На долю мембранных опреснительных установок приходится 23% [7], электродиализных – 10%.

Опресненная вода в основном используется для коммунального (60%), промышленного (19%) водоснабжения, в энергетике (6%). В СНГ в настоящее время суммарная мощность всех средств опреснения составляет более 400 тыс. $м^3$/сутки. Преобладающими методами опреснения воды являются дистилляция, электродиализ и электролиз.

В некоторых районах Республики Таджикистана (Северная часть), на примере. Матчинский. Дж. Расуловский, Спитаменский вода которая используется для питьевых и хозяйственных нужд имеет высокую жесткость и общая жесткость доходит до 50 мг зкв./л. Преимущественно эти воды являются артезианскими.

Цель настоящей работы заключалась изучить диффузионную и осмотическую проницаемость ионитовых мембран МК-40 и МА-40. В качестве исследуемых растворов выбраны наиболее часто встречающиеся в природных водах электролиты: $CuCl_2$; $CaCl_2$; $MgCl_2$. Перед экспериментом с целью

набухание мембран испытуемые образцы подготавливали согласно ГОСТу 17553-72. Катионитовые мембраны МК-40 обрабатывали 3 %-ным раствором NaOH в течение 3-ёх часов. Далее тщательно промывали дистиллированной водой до pH равной 5.5-6.5. Анионитовые мембраны МА-40 обрабатывали 3-ёх процентным раствором Na_2CO_3 (можно также NaOH) в течение 5 часов. Далее также промывали дистиллированной водой до pH 5.5-6.5.

Э к с п е р и м е н т а л ь н а я ч а с т ь

В работе использовали ячейку, использованную в работе [10]. Коэффициент осмотической проницаемости ($\beta_{осм}$) определялись по формуле [9]

$$\beta_{осм} = \Delta\vartheta\delta / M\, Sc\tau\,, \qquad (1)$$

где ($\Delta\vartheta$) – изменение объема дистиллированной воды, мл; δ – толщина набухшего образца мембраны, см; M – молекулярная масса воды, г; S – полезная площадь мембраны, $см^2$; c – концентрация внешнего раствора, моль/л; τ – продолжительность опыта, час.

Коэффициент диффузионной проницаемость ($\beta_{диф}$) рассчитывались исходя из количества электролита (Q, моль) перенесенного в камеры 1 и 3 по уравнению

$$\beta_{диф} = Q\delta / cS\tau\,, \qquad (2)$$

Продолжительность опыта установлена предварительно на основе снятия кривых зависимости $\beta_{диф}$ от времени (τ) (рис. 1) на примере раствора $CaC1_2$ (0,5 моль). Характер полученных кривых (рис. 1) показывает, что стационарная диффузионная проницаемость достигается через 5-6 часов. Начальное увеличение коэффициентов связано с движением фронта диффузии в ионнообменной мембране. В связи с этим во всех последующих опытах $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ определяли через 6 часов после начала эксперимента.

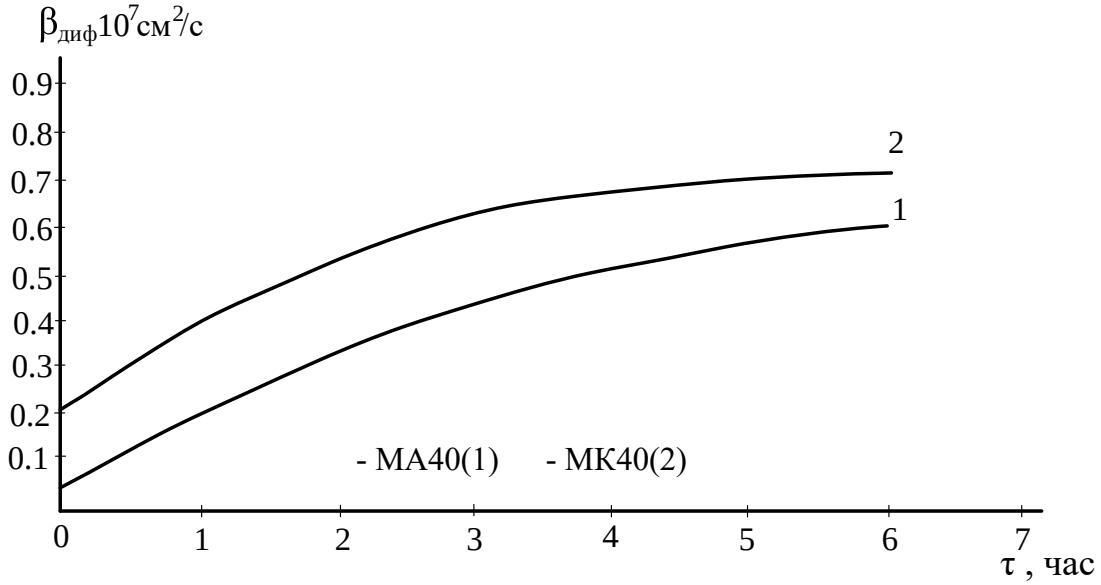


Рис. 1. Зависимость $\beta_{диф}$ мембран МА-40 (1) и МК-40 (2) в 0.5 М растворе $CaCl_2$; от продолжительности опыта.

При изменении набухания мембраны зазоры между частицами ионита и связующего полимером могут необратимо увеличиваться. В связи с этим могут меняться $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ мембран. Для

выяснения этого вопроса были поставлены дополнительные опыты. Мембраны МА-40 и МК-40 поочередно выдерживали по 20 мин. в 1.0 М растворе LiCl, дистиллированной воде и 0.5 М растворе $CaCl_2$. Выбор указанных электролитов связаны с тем, что набухание в соответствующих солевых форм, на примере сульфокатионит КУ-2 отличается в 1.3 раза. Полученные данные показывают, что изменение $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ зависимости от количество циклов указанной обработки находится в пределах ошибки опыта (см. табл. 1).

Исследованные мембраны МК-40 и МА-40 в приведенных растворах электролитов показывали прямолинейной зависимости $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ от концентрации (С, моль/л).

Полученная линейная зависимость описывается уравнением [9] ,

$$\beta_{осм} \cdot \beta_{диф} = a + bc\,, \tag{3}$$

где a и b эмпирические константы и рассчитывались по способу наименьших квадратов и представлены в табл. 2.

Таблица 1

Зависимость изменение $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ от количества циклов обработки

Тип мембраны	Число циклов	$\beta_{осм}$	$\beta_{диф}$
МК-40	0	$0.50\cdot10^{-7}$	$1.6\cdot10^{-5}$
	5	$0.53\cdot10^{-7}$	$1.5\cdot10^{-5}$
	10	$0.49\cdot10^{-7}$	$1.6\cdot10^{-5}$
МА-40	0	$0.20\cdot10^{-7}$	$3.4\cdot10^{-5}$
	5	$0.18\cdot10^{-7}$	$3.3\cdot10^{-5}$
	10	$0.21\cdot10^{-7}$	$3.3\cdot10^{-5}$

Таблица 2

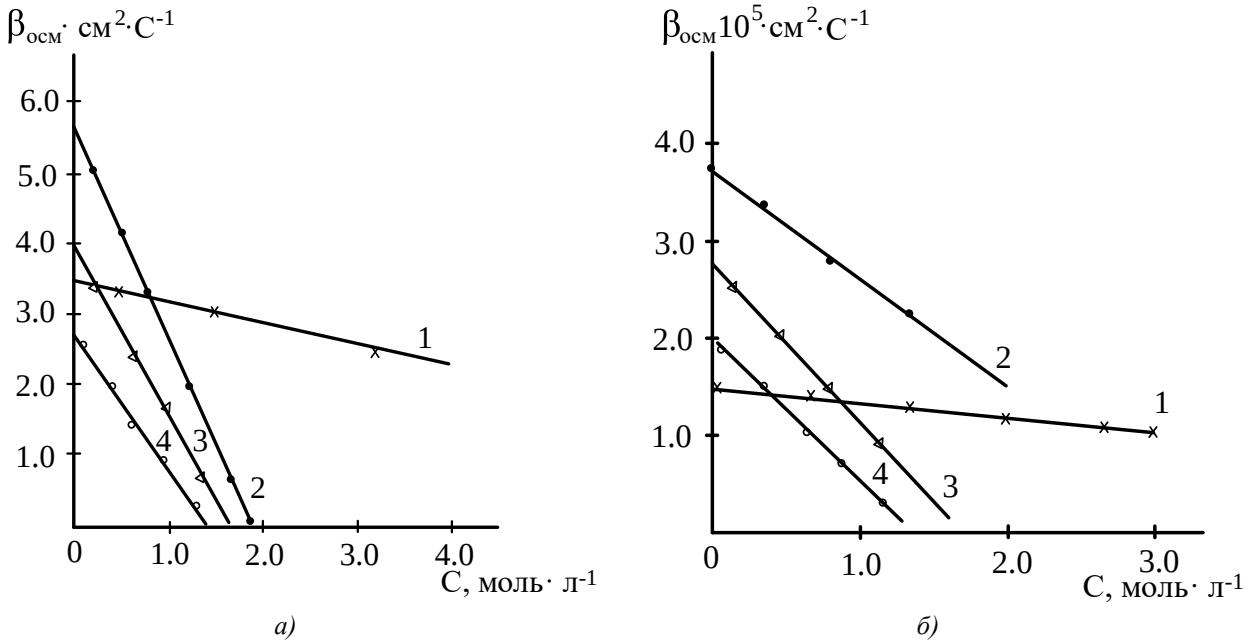
Раствор электролитов	Проницаемость мембран			
	Осмотическая		Диффузионная	
	a:10^5см$^2\cdot$с$^{-1}$	b:10^5см$^5\cdot$с$^{-1}$ моль	a:10^7см$^2\cdot$с$^{-1}$	b:10^7см$^5\cdot$с$^{-1}$ моль
МА-40				
$CaCl_2$	2.80	-17.00	0.055	0.285
$MgCl_2$	4.05	-2.15	0.060	0.245
$CuCl_2$	3.14	1.90	0.070	0.264
NaCl	1.20	0.37	4.360	1,000
МК-40				
$CaCl_2$	3.05	-1.86	0.41	0.86
$MgCl_2$	5.90	-3.27	0.20	0.15
$CuCl_2$	4.71	-2.54	0.33	0.28
NaCl	3.80	-0.75	0.22	0.14

Как показывают опыты с увеличением концентрации электролитов $\beta_{осм}$ уменьшается, что можно объяснить уменьшением набухания ионита. Небольшие значения (a) в растворах $CaCl_2$, $MgCl_2$, $CuCl_2$ объясняется уменьшением поглощения коионов с увеличением их заряда. Отмечается аномально большие значения коэффициента (a) для раствора HC1, что можно объяснить большой подвижностью коионов водорода и большим набуханием мембраны. Сопоставление данных по диффузионной проницаемости мембран МК-40 и МА-40 (см. табл. 2) показывает, что на указанные величины больше влияет подвижность коиона, а противоиона – значительно меньше.

Таким образом, полученные значения $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ в исследованных растворах электролитов дают предпосылки для правильного выбора метода опреснения воды содержащих ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}. Как выяснилось стационарная диффузионная и осмотическая проницаемость достигает через 5-6 часов. За это время мембраны готовы к ионному обмену. В ряде зарубежных стран для деминерализации вод используют различные опреснительные установки [3-9].

На рисунках 2, 3 приведены изменения осмотической и диффузионной проницаемости мембран МК-40 и МА-40 от концентрации внешнего раствора электролитов. Как видны из ранних работ [9]. Набухаемость мембран происходит через 5-6 часов. В данной работе перед начало опытов мембраны МА-40 и МК-40 выдерживались в растворе 0.5 моль $CaCl_2$ в течение 6-ти часов. В связи с этим во всех последующих опытах $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ определялись в зависимости от концентрации растворов электролитов через 6 часов после начала эксперимента.

На рис. 1, 2 приведены изменения $\beta_{осм}$ мембран МА-40 и МК-40 в зависимости от концентрации исследованных электролитов; NaCl, $CaCl_2$, $CuCl_2$ и $MgCl_2$. Как видны из рисунков с повышением концентрации электролитов осмотическая проницаемость ($\beta_{осм}$) обеих типов мембран уменьшается, что связаны с подвижностью ионов. Однозарядные ионы в силу меньшего размера осмотически проникают через тольщу мембраны и уносятся дистиллированной водой которая заполнена боковые камеры ячейки. Большую подвижность имеет однозарядные ионы например раствор NaCl (кривая 1). Как видны из кривых с увеличением концентрации электролитов, имеющих 2-х зарядных катионов уменьшения $\beta_{осм}$ одинаковые для обеих типов мембран. При очень высоких концентрациях электролитов $\beta_{осм}$ может равняться нулю.



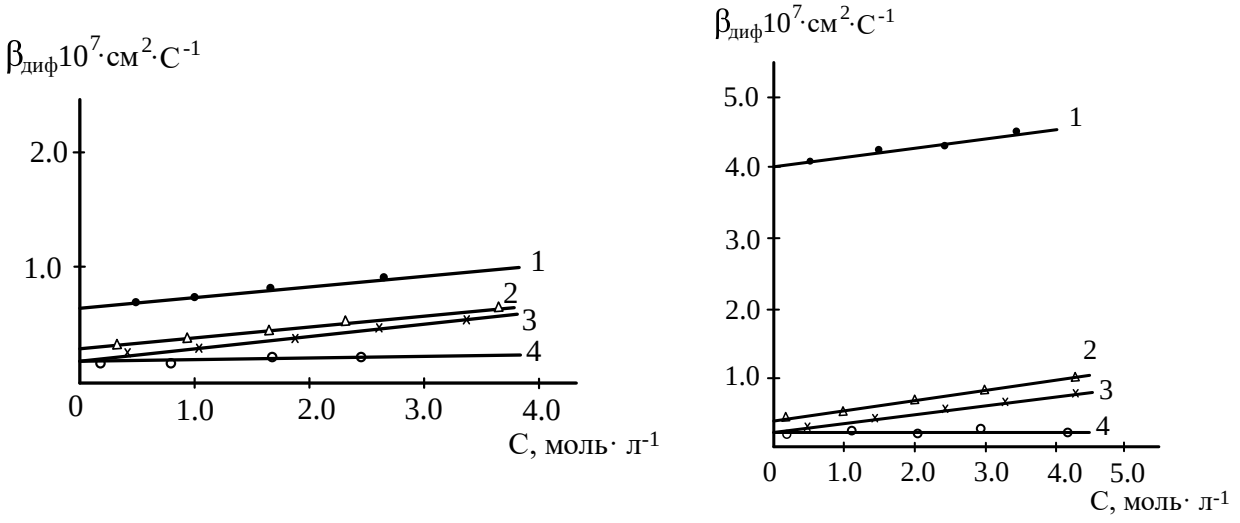
а) *б)*

Рис. 2. Изменения осмотической проницаемости мембран МА-40 (а) и МК-40 (б) в зависимости от концентрации внешнего электролита 1 – NaCl; 2 – $CaCl_2$; 3 – $CuCl_2$; 4 – $MgCl_2$.

При прохождении электролитов через слой мембраны происходит обменная реакция (ионов) и через некоторое время может наступать равновесие на границе раздела фаз сопровождающего возникновением потенциала и можно записывать следующим образом,

$$E_{\partial} = \frac{RT}{ZF} ln \frac{a_i}{\overline{a}_i}, \tag{4}$$

где $E_д$ – потенциал доннона, R – газовая постоянная, T – температура, Z – заряд ионов, F – число фарадея, a_i – активность ионов в растворе, $\overline{a}_i$ – активность фаза ионита.Коэффициент диффузионной проницаемости ($\beta_{диф}$) мембран МА и МК (см. рис. 3) в исследованных электролитах несколько увеличивается с ростом концентрации. Особенно четко видно для растворах NaCl. Для двухзарядных катионов таких как Ca^{2+} и Cu^{2+}данная тенденция схоже с однозарядным ионом Na^{+}. Что касается ионов Mg^2, с увеличением концентрации $MgCl_2$ $\beta_{диф}$ остается постоянным независимо от концентрации. Это означает, что избавится от ионов магния при очистке вод ионитами МК-40 и МА-40 не удается, необходимо применять метод электродиализа.



а) *б)*

Рис. 3. Изменения диффузионной проницаемости мембран МА-40 (а) и МК-40 (б) в зависимости от концентрации внешнего электролита 1-NaCl; 2-$CaCl_2$; 3-$CuCl_2$; 4-$MgCl_2$.

Таким образом, до проведения электродиализа необходима исследовать ионитовых мембран МК-40 и МА-40 на диффузионную и осмотическую проницаемость. Эти показатели определяют самопроизвольность процессов диффузии ионов, а также под действием осмоса. При больших значениях $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ очистка растворов от ионов указанных металлов электродиализом протекает эффективнее.

В ы в о д ы

Определены коэффициентов диффузионной и осмотической проницаемости ионитовых мембран МА-40 и МК-40 в среде однокомпонентных растворов электролитов NaCl, $CuCl_2$, $MgCl_2$ и $CaCl_2$ различной концентрации.

Установлена оптимальное время набухания мембраны МА-40 и МК-40 в растворе 0.5 м $CaCl_2$, что составляет 5-6 часов.

Полученные значения $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ в исследованных растворах солей меди, кальция и магния сопоставимы со значениями $\beta_{осм}$ и $\beta_{диф}$ проницаемости этих же мембран в растворах одновалентной соли. Это свидетельствуют о возможности испытания электродиализного способа для очистки водных растворов 2-х валентных солей содержащих тяжелых металлов.

Поступило23.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Desalination momentum picks up – Compass Air, 1983, 88, 9, pp. 6-11.
2. Ivojcik Ch., Maadhah Ali G. Waters and desalination programs of Saudi Arabia 1981, 8, №2 p. 3-21. РЖ Химия, 1982, 21 И 343.
3. Tatano Junzo. Установка по опреснению морской воды в Саудовской Аравий Кадаки Кодаки, 1980, 44 II, p. 680-683. РЖ Химия, 1981, 11 И 300.
4. Fouly M.F., Khatil E.E. The water problem in Egypt-Ibid, pp. 206-212.
5. EI Hares H., Aswed M. Trends in Libyan desalination and water peuse policy Ibid, pp. 163-173.
6. Опріснения мінерализование вод. А.Т. Пилипенко, А.К. Запольский Р.В. Вайцеховский та – ін Вісн АН УССР, 1981, №4, с. 81-86.
7. Временные рекомендации по использованию опреснённой воды в сельском хозяйстве. М.В. Колодин, М.В. Санин, Л.И. Эльпинер, Ю.А. Рахманин. – Алма – Ата: Ылым, 1988. – 210 с.
8. Строительные нормы и правила СН и П2.04.02.-84 «Водоснабжение». Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1986.
9. Греденюк В.Д., Мозо А.А. Обессоливание воды ионитами. – М.: химия, 1980. -155 с.
10. Муродиён А., Сафаров А.Г., Холмуродов Ф., и др. Диффузионная и осмотическая проницаемость ионитовых мембран МК-40 и МА-40. 7-ая. Международная конференция «Современные проблемы физики». ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ, г. Душанбе, 9-10 октября 2020 г., с. 238-242.

А.Ш.Муродиён, А.Г.Сафаров, Б.С.Ҷамолзода

ТАҲҚИҚИ ГУЗАРОНИШИ ОСМОТИКӢ ВА ДИФФУЗИОНИИ МЕМБРАНАҲОИ ИОНИТИИ МА-40 ВА МК-40 ДАР МАҲЛУЛҲОИ ЭЛЕКТРОЛИТИИ ЯККОМПОНЕНТА

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови АМИ Тоҷикистон

Натиҷаҳои таҳқиқотҳои гузарониши осмотикӣ ва диффузионии мембаранаҳои ионитии МА-40 ва МК-40 дар маҳлулҳои обии электролитҳои яккомпонентаи NaCl; $CaCl_2$; $CuCl_2$; $MgCl_2$ оварда шудааст. Тағирёбии коэффисиентҳои гузарониши осмотикӣ ($\beta_{осм}$) ва диффузионии ($\beta_{диф}$) мембранаҳои мазкур аз сикли коркард муайян карда шуда вобастагии хаттӣ доштани $\beta_{осм}$ ва $\beta_{диф}$ аз консентратсияи маҳлулҳои электролитӣ нишон дода шудааст. Вақти оптималии варамкунии мембаранаҳо муайян карда шуда аз 5 то 6 соатро ташкил медиҳад. Муодилаи хаттии вобастагии $\beta_{осм}$ ва $\beta_{диф}$ аз консентратсияи электролитҳо муайян карда шуда намуди $\beta_{осм} \cdot \beta_{диф} = a + bc$ дорад, ки a ва b константаҳои эмперикӣ буда аз руи методи

хурдтарини квадратӣ муайян карда шудааст (метод наименьшего квадрата). Ҳамин тариқ, қимматҳои ҳосилшудаи $\beta_{осм}$ ва $\beta_{диф}$ дар маҳлулҳои обии электролитии таҳқиқшуда гувоҳи дурусти интихоби методи бенамакгардонии обҳое, ки дар таркибашон ионҳои Cu^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} доранд медиҳанд.

Калимаҳои калидӣ: *мембрана (парда), осмос, диффузия, гузарониш, электролит, электродиализ, бенамаккунӣ, ҷойивазкунии ионӣ, консентрат.*

A.Sh.Murodiyon, A.G.Safarov, B.S.Jamolzoda

STUDY OF OSMOTIC AND DIFFUSION PERMEABILITY OF IONITE MEMBRANES MA-40 AND MK-40 IN ONE-COMPONENT ELECTROLYTE SOLUTIONS

National Academy of Sciences of Tajikistan,
S.U.Umarov Physical-Technical Institute, NAS of Tajikistan

The article presents the results of the study of osmotic and diffusion permeability of ionic membranes MA-40 and MK-40 in single-component aqueous solutions of electrolytes NaCl, $CaCl_2$, $CuCl_2$ and $MgCl_2$ of different concentrations. The changes in the coefficients of osmotic ($\beta_{osm.}$) and diffusion ($\beta_{diff.}$) permeability of membranes on the number of processing cycles are presented and the linear dependences of βdiff. and βosm. on the concentration of electrolyte solutions are shown. The optimal swelling time of the membranes is determined, which is from 5 to 6 hours. The obtained linear dependence of $\beta_{osm.}$ and $\beta_{diff.}$ of membranes in the studied solutions is of the form $\beta_{osm} \cdot \beta_{diff} = a + bc$, where a and b are empirical constants. Constants (*a*) and (*b*) were calculated by the least squares method. Thus, the obtained values of β_{osm} and β_{diff} in the studied aqueous solutions of electrolytes provide grounds for the correct choice of the method for desalination of water containing Cu^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}.

Key words: *membrane, osmosis, diffusion, permeability, electrolyte, electrodialysis, desalination, ion exchange, concentrate.*

Сведения об авторах:

1. **Муродиён Асрор Шариф** – д.т.н., доцент, ФТИ им. С.У. Умарова НАН Таджикистана, гл. науч. сотр. ЦИИИ ВИЭ. E-mail: murodiyona@talco-s.tj;
2. **Сафаров Амиршо Гоибович** – д.т.н., доцент, ФТИ им. С.У.Умарова НАН Таджикистана, рук. Центра исследования и использования ВИЭ. E-mail: amirsho71@mail.ru;
3. **Джамолзода Бехрузи Саъдонхуджа** – к.т.н., ТТУ им. акад. М.С. Осими, доцент каф. «Электроснабжение». E-mail: jamolzoda_behruz@mail.ru.

ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.064.2-502.2.05
Специальность: 1.5.15. Экология

Х.М.Назаров, Б.Д.Бобоев, Х.И.Тиллозода, Ф.З.Шафиев

РАДИАЦИОННАЯ СИТУАЦИЯ В ЗОНЕ «АКСИКОНКУЛЬ» АШТСКОГО РАЙОНА СОГДИЙСКОЙ ОБЛАСТИ

Национальная академия наук Таджикистана,
Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана У.Мирсаидовым 11.06.2025 г.)

В статье приводятся результаты мониторинга радиационной ситуации в зоне «Аксиконкуль» Аштского района Согдийской области, которая включает в себя грязелечебницу «Аксикон» и строящийся санаторий «Бунёд». Результаты радиационного мониторинга могут способствовать активному привлечению как жителей страны, так и иностранных гостей из зарубежных стран для комфортного отдыха и лечения в условиях радиационной безопасности.

Ключевые слова: *грязелечебница, Аксикон, Бунёд, санаторий, мониторинг, радиационная ситуация, отдых, лечение.*

В в е д е н и е

На севере Таджикистана, вблизи границы с Республикой Узбекистан, находится уникальное соленое озеро «Аксиконкуль», площадь которого составляет около 12 тыс. м^2. Наибольшая глубина озера достигает 50-70 см в холодный сезон, в середине лета оно пересыхает. И вот как раз под образующейся толстой соляной коркой формируется иловая грязь, которая имеет значительную лечебную ценность. В Таджикистане указанное озеро является самым крупным по величине и по мощности залегания запасов лечебной иловой грязи. Грязелечебница «Аксикон» работает сезонно, в период с июня по август [1].

Сюда приезжают пациенты с такими недугами как артрит, остеохондроз, радикулит, заболевания центральной нервной системы. Полезна иловая грязь также тем, у кого есть проблемы с кожей, например, экзема, дерматиты. Врачи утверждают, что иловая грязь полезна и тем, кто страдает от аллергической бронхиальной астмы. Но сюда едут не только лечиться, природная красота притягивает к озеру туристов из разных уголков Центральной Азии.

Лечебная грязь озера «Аксиконкуль» представляет собой маслянистую пасту черного цвета с серым дном, от которой исходит неприятный запах сероводорода. Толщина слоя лечебной грязи колеблется от 5 до 20 см в западной части и 30-40 см в восточной части. Оползень в основном расположен в восточной части озера, истончается к западу, постепенно превращаясь в песок и исчезая. Он состоит

Адрес для корреспонденции: *Шафиев Фируз Зафарович. 734025, Таджикистан, г.Душанбе, проспект Рудаки, 33, Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана. E-mail: f.shafiev@cbrn.tj.*

из неорганических, органических соединений, микроорганизмов, радиоактивных элементов и так далее. Установлено, что в грязи присутствует 93 вида химических элементов [2].

Неорганические химические вещества включают хлорид натрия, сульфид натрия, кремниевую кислоту, соединения алюминия, железо, сульфат-карбонат, а также определенные элементы, такие как магний, бор, калий, фосфор и другие.

Из органического вещества грязи образуются биологически активные вещества, витамины, ферменты, гормоны, антибиотики, аминокислоты, усиливающие лечебные свойства грязи.

В ходе мониторинга в целях измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАЭД) был использован комплекс обнаружения радиации PackEye (FHT 1377, производства Thermo Fisher Scientific (США) и дозиметр рентгеновского и гамма-излучений ДКС-АТ1121, производства Атомтех (Республика Беларусь).

Для анализа удельной активности (УА) естественных радионуклидов (ЕРН) в почве на исследуемой территории были отобраны пробы согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017 [3] до глубины 25 см от поверхности земли.

Далее в целях определения объемной и удельной активности гамма-излучающих ЕРН, на основании требований раздела 9.3 «Методики выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{40}K» был использован гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315 [4].

Р е з у л ь т а т ы о б с л е д о в а н и й

Измерения мощности дозы гамма-излучения в зоне «Аксиконкуль» в Аштском районе Согдийской области показали, что на территории грязелечебницы «Аксикон» из 527 измерений их значения составляют от 0.07 до 0.25 мкЗв/час (среднее 0.15 мкЗв/час) и на территории санатории «Бунёд» из 93 измерений эти значения составляет от 0.11 до 0.22 мкЗв/час (среднее 0.17 мкЗв/час) (рис. 1). Эти значения находятся в пределах фонового значения местности.

Рис. 1. Карта радиационного мониторинга гамма-излучения в зоне «Аксиконкуль».

Гамма-спектрометрический анализ почв, отобранных на территории грязелечебницы «Аксикон» и строящегося санатория «Бунёд» Аштского района Согдийской области показали, что они содержат в основном природные радионуклиды (радий-226, торий-232 и калий-40) в допустимых количествах (табл. 1).

Таблица 1

Среднее содержание радионуклидов в пробах почв, отобранных в зоне «Аксиконкуль»

№ проб	Наименование проб	Координаты отбора проб	ЕРН	Активность, Бк/кг	Стат. погр., %	Абс. погр., Бк/кг	$A_{эфф.}$, Бк/кг	$A_{эфф.м.}$, Бк/кг
Соленое озеро “Аксиконкуль”								
1	почва	70.39263 в.д. 40.51056 с.ш.	^{226}Ra	31.9	6.0	3.77	153±10.4	196
			^{232}Th	41.7	4.1	4.57		
			^{40}K	746	5.2	85.8		
2	илы	70.39197 в.д. 40.51080 с.ш.	^{226}Ra	20.1	6.9	2.48	81.6±5.94	108
			^{232}Th	19.2	6.2	2.30		
			^{40}K	405	7.0	50.1		
3	соль	70.39197 в.д. 40.51080 с.ш.	^{226}Ra	0	0	-	5.97±2.82	8.79
			^{232}Th	0	0	-		
			^{40}K	66.4	38.5	25.5		
грязелечебницы «Аксикон»								
4	почва	70.39197 в.д. 40.51080 с.ш.	^{226}Ra	35.6	4.5	3.98	116±8.00	160
			^{232}Th	22.7	6.1	2.70		
			^{40}K	569	5.8	66.9		
5	почва	70.39552 в.д. 40.51949 с.ш.	^{226}Ra	35.7	4.8	4.04	129±8.81	173
			^{232}Th	27.0	5.6	3.14		
			^{40}K	642	5.5	74.6		
6	почва	70.39535 в.д. 40.51946 с.ш.	^{226}Ra	30.8	5.4	3.56	119±8.19	158
			^{232}Th	28.2	5.2	3.24		
			^{40}K	575	5.8	67.5		
санатории «Бунёд»								
7	почва	70,387999 в.д. 40,517485 с.ш.	^{226}Ra	39.4	4.7	4.42	153±10.2	203
			^{232}Th	36.3	4.3	4.02		
			^{40}K	741	5.1	84.7		
8	почва	70,38739 в.д. 40,516942 с.ш.	^{226}Ra	34.5	4.9	3.92	132±8.86	176
			^{232}Th	32.6	4.6	3.65		
			^{40}K	615	5.4	71.1		
9	почва	70,386948 в.д. 40,516907 с.ш.	^{226}Ra	26.2	6.0	3.11	113±7.79	147
			^{232}Th	29.4	4.7	3.30		
			^{40}K	544	5.7	63.8		
10	почва	70,386516 в.д. 40,517303 с.ш.	^{226}Ra	42.0	4.4	4.67	194±12.4	248
			^{232}Th	54.9	3.1	5.71		
			^{40}K	896	4.2	98.5		
11	почва	70,387639 в.д. 40,517195 с.ш.	^{226}Ra	32.9	5.0	3.75	132±8.9	174
			^{232}Th	32,3	4,4	3,59		
			^{40}K	636	5,4	73,5		

Также исследованы физические параметры вод, отобранных в зоне «Аксиконкуль» и результаты обобщены в табл. 2.

Таблица 2

Физические параметры вод, отобранных в зоне «Аксиконкула»

№ проб	Координаты отбора проб	pH	ОВП, мВ	EC, мкСм/см	TDS, мг/л	O_2, мг/л
Вода питьевая	70.39535 в.д. 40.51946 с.ш.	7.67	-43	430.4	172.1	5.48
Соленая вода	70.39197 в.д. 40.51080 с.ш.	7.74	-48	138.0	55.19	0.58
Вода питьевая и поливная	70.387542 в.д. 40.517908 с.ш.	6.8	13	7.46	2.99	8.33

Общее количество растворенных твердых частиц находится в пределах от 55.19 мг/л (в питьевые воды) до 172.1 мг/л (в соленые воды). Среднее значение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) питьевые воды составляет -43 мВ, а у соленой воды -48 мВ. Величина электропроводности (EC) исследуемых вод равно 138 мкСм/см (в соленые воды) и 430.4 мкСм/см (в питьевые воды). Все физические параметры проб воды соответствуют установленным нормам ПДК.

Таблица 3

Химические состав проб воды, отобранных в зоне «Аксиконкула»

Наименование	Вода питьевая из скважин санатории «Бунёд»			Вода из соленого озера «Аксиконкуль»	ПДК
	Проба №1	Проба №2	Проба №3	Проба №4	
Общая жесткость, мг·экв/л	7.2	44.6	46.6	25.4	7
NH_4^+, мг/л	0.2	40.0	38.0	> п.о.	
$K^+ + Na^+$, мг/л	101	846	865	6161.7	
Mg^{2+}, мг/л	13.4	348	348	> п.о.	
Ca^{2+}, мг/л	122	321	361	2605.2	
Cl^-, мг/л	0.2	40.0	38.0	2000	350
SO_4^{2-}, мг/л	101	846	865	10907.7	500
HCO_3^-, мг/л	13.4	348	348	549.1	
Сухой остаток, мг/л	732	5251	5420	34650.6	1000

З а к л ю ч е н и е

По результатам измерений естественного радиационного фона на территории грязелечебницы «Аксикон» и строящегося санатория «Бунёд» Аштского района Согдийской области аномальные точки не выявлены. Содержание естественных радионуклидов в почвах территорий, прилегающих к объекту, соответствует природному фону для данной местности. В общем, с точки зрения радиационной безопасности, указанная зона является благополучной для привлечения местных и зарубежных туристов в оздоровительных целях и для комфортного отдыха.

Поступило 11.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мухаммадумар А. От потомков Авицены. – Душанбе: Пресс, 2007.

2. Нурматов Ш. Ш. Аксикон – единственная лечебная грязь в Таджикистане – IV-Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, преподавателей «Прикладные вопросы точных наук», 2020.
3. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2018, 9 с.
4. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-бета-спектрометры типа МКС–АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-спектрометре типа EL 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды. – Минск: Атомтех, 2011. - 32 с.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-06): Санитарные нормы и правила СанПин 2.6.1.001-06. – Утверждены приказом директора АЯРБ АН РТ от 25.12.2006 г. №12. Зарегистрировано в Министерстве юстиции РТ 16.01.2007 г, регистрационный №237.

Х.М.Назаров, Б.Д.Бобоев, Х.И.Тиллозода, Ф.З.Шафиев

ВАЗЪИ РАДИАТСИОНӢ ДАР МИНТАҚАИ «АКСИКОНКӮЛ»-И НОҲИЯИ АШТИ ВИЛОЯТИ СУҒД

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои мониторинги вазъи радиатсионӣ дар дар минтақаи «Аксиконкӯл»-и ноҳияи Ашти вилояти Суғд, ки дар худ табобатгоҳи «Аксикон» ва осоишгоҳи сохташуда истодаи «Бунёд»-ро дарбар мегирад. Натиҷаҳои мониторинги радиатсионӣ метавонад ба ҷалби фаъоли ҳам сокинони кишвар ва ҳам меҳмонони хориҷӣ аз кишварҳои хориҷӣ барои истироҳату муолиҷаи бароҳатро дар шароити бехатарии радиатсионӣ мусоидат намояд.

Калимаҳои калидӣ: *муолиҷаи лойи, Аксикон, мониторинг, ҳолати радиатсионӣ, табобат, истироҳат.*

Kh.M.Nazarov, B.D.Boboev, H.I.Tillozoda, F.Z.Shafiev

RADIATION SITUATION IN THE TERRITORY OF THE MUD CLINIC "AKSIKON" IN THE ASHT DISTRICT OF THE SUGHD REGION

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Safety and Security Agency, NAS of Tajikistan

The article presents the results of monitoring the radiation situation on the territory of the mud baths "Aksikon" and the sanatorium "Bunyod" in the Asht district of the Sughd region. The results of radiation monitoring can contribute to the active attraction of both residents of the country and foreign guests from foreign countries for comfortable rest and treatment.

Key words: *mud therapy, Aksikon, monitoring, radiation situation, treatment, recreation.*

Сведения об авторах:

1. **Назаров Холмурод Марипович** – д.т.н., профессор, Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, зам. директора. E-mail: holmurod18@mail.ru;
2. **Бобоев Бегмурот Дустович** – к.х.н., Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Согдийской области, заведующий сектора. E-mail: b.boboev@cbrn.tj;
3. **Тиллозода Хаким Иброгим** – к.х.н., доцент, Филиала Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, заведующий научно-исследовательского сектора. E-mail: tilloboev-2006@mail.ru;
4. **Шафиев Фируз Зафарович** – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, соискатель отдела кибербезопасности, гарантии, подготовки и реагирования на инциденты ХБРЯ. E-mail: f.shafiev@cbrn.tj.

ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.064÷504.75(575.3)
Специальность: 03.02.08 Экология

Ш.Муродзода (Ш.Р.Муродов), С.В.Муминов, И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов), член-корреспондент НАН Таджикистана И.Ф.Рахимов

РАДИОНУКЛИДЫ В ПОЧВАХ ТАДЖИКИСТАНА

Национальная академия наук Таджикистана,
Агенство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана

Изучено содержание природных радионуклидов в почвах Таджикистана на примере цезия-137. Максимальные значения удельной активности цезия-137 наблюдаются в местности Камароб Рашт-ского района, которые составляют 147.5 Бк/кг.

Ключевые слова: *радионуклиды, изотоп, цезия-137, почва, удельная активность.*

Как известно, источниками внешнего облучения человека являются радиоактивные вещества, содержащиеся в почве, воздухе, воде, строительных материалах, а также космические лучи [1]. При этом на долю эндогенных радионуклидов (без учёта радона) приходится свыше 25% облучения населения земли природными источниками, что составляет около 20% годовых доз облучения от общего количества источников (включая антропогенные источники, на которые приходится 0.77 мЗв/год от общего облучения, составляющего 4.06 мЗв/год) [2]. Вклад природных радионуклидов (ЕРН) – ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{40}K, которые наиболее часто присутствуют в горных породах, составляет величину в два раза большую по сравнению с вкладом в облучение космических лучей, и несколько ниже доз облучения от выбросов радона и медицинского радиологического облучения.

В работе [1] даны оценки пространственных закономерностей естественного радиационного фона, роли почвообразования и техногенеза, как факторов распределения природных радионуклидов.

На территории Таджикистана почвенный покров разнообразен и чётко промывается поясность по почвам. В работах [2-4] подробно изучили накопления изотопа цезия-137 в почве за счет атмосферных выпадений на юго-западе Таджикистана. Изучены радионуклиды в строительных материалах, а также изучены условия хранения радиоактивных отходов. Изучен радионуклидный мониторинг различных населённых пунктов Таджикистана. В прежние годы в Таджикистане не наблюдался изотоп цезия-137 в почвах. Однако, как показали исследования сотрудников ХБРЯ НАН Таджикистана, из-за ядерных испытаний в Китае, Индии и Пакистане в почвах идет накопление изотопа цезия-137.

Как известно, Таджикистан по характеру своего рельефа – типичная горная страна с абсолютными высотами поверхностей от 300 до 7495 метров. Почти половина территории республики

Адрес для корреспонденции: *Муродзода Шохин 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33, Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана. E-mail: sh.murodov@cbrn.tj.*

расположена на высоте более 3 тыс. м. Для Таджикистана характерна “поэтажная” смена рельефа. Можно выделить следующие пояса: равнинный (на высоте от 300 до 900 м над ур. м.), предгорный (900-1600 м), низкогорный (l600-2300 м), среднегорный (2300-3500 м) и высокогорный (выше 3500 м). Равнины занимают лишь 7% территории республики.

В настоящей работе изучено содержание радионуклидов в почвах Таджикистана в районах с различными климатическими условиями.

Территории исследования и пробоотбора включали в себя разнообразные ландшафты, такие как альпийские луга, высокогорные и равнинные пустыни, глубокие и узкие ущелья рек, сжатые скалистыми хребтами и др. (рис. 1). Пробоотбор проводился на территориях Гиссарского, Раштского, Бохтарского, Кулябского регионов и Согдийской области Таджикистана. Для исследования было отобрано 134 образца почв различных типов (табл. 1).

Рис. 1. Карта территориального деления Таджикистана: 1 – Северный Таджикистан; 2 – Центральный Таджикистан; 3 – Южный Таджикистан; 4 – Восточный Таджикистан.

Пробы отбирались в зависимости от рельефа и механических свойств почв в 2018-2020 гг. в центральной, южной, юго-восточной частях и в 2021-2022 гг. – в северной части Таджикистана.

Таблица 1

Сведения об отобранных пробах и характеристике местности

Территориальное деление	Тип площадки	Тип почвы	Количество отобранных проб	Усредненная УА цезия-137 в почве, Бк/кг
Северные районы	Среднегорный с горными коричневыми почвами	Скалистый, глинистый	41	11.5
Центральные районы	Среднегорный с горными коричневыми почвами	Глинистый	30	11.42
Южные районы	Равнинно-низкогорный в основном с серозёмными почвами	Песчаный	44	4.5
Юго-восточные районы	Высокогорный с высокогорными пустынно-степными, занговыми и пустынными почвами	Скалистый	19	17.0

В каждом регионе было выбрано от 20 до 40 точек для отбора проб, где минимальное расстояние между точками составляет примерно 5-7 км. Пробоотбор почвы проводился согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017 от поверхности земли до глубины 25 см. Отобранные пробы разделили на две категории: пробы почвы из необрабатываемых земель и почва из обрабатываемых полей. Каждая проба в точке отбора очищалась от камней, корней и других включений. Из общей массы образца методом квартования отбирали более 1 л пробы. Почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали на мельнице и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Для измерения и анализа проб использовали стандартный сосуд «Маринелли» объёмом 1 л. Измерения проводились на гамма-спектрометре с детектором из особо чистого германия (CANBERA, программное обеспечение Genie-2000) с неопределённостью измерения от 6 до 13%, в аккредитованной «Лаборатории технических услуг» Агентства по ХБРЯ безопасности НАНТ.

На рис. 2 приведены карты средней удельной активности (УА) цезия-137 в почвах различных районов Таджикистана в Бк/кг.

На основании сравнений результатов измерений выявлены основные закономерности и характер пространственного распределения цезия-137 в почвенном покрове Таджикистана. Результаты по средней УА цезия-137 в почвах северных, центральных, южных и юго-восточных районов Таджикистана приведены на рис 3.

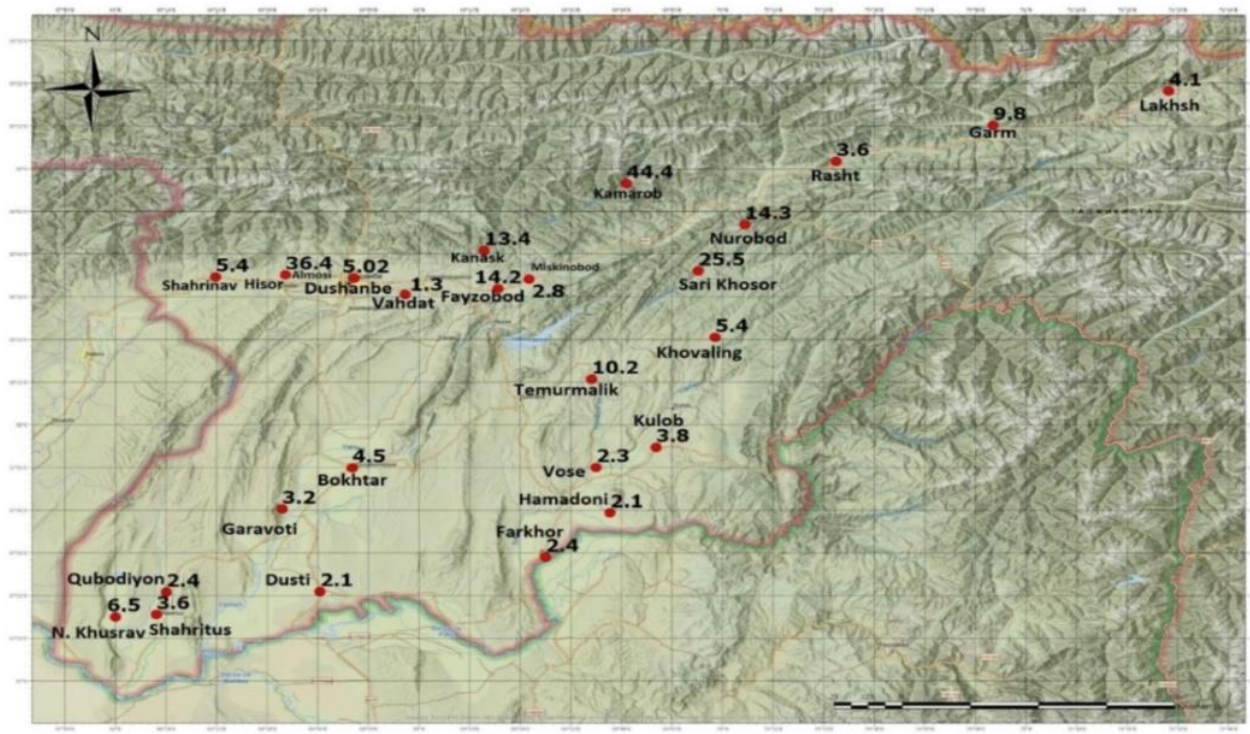


Рис. 2. Карта усреднённых значений содержания цезия-137 в почвах центральной и южной частей Таджикистана (в Бк/кг).

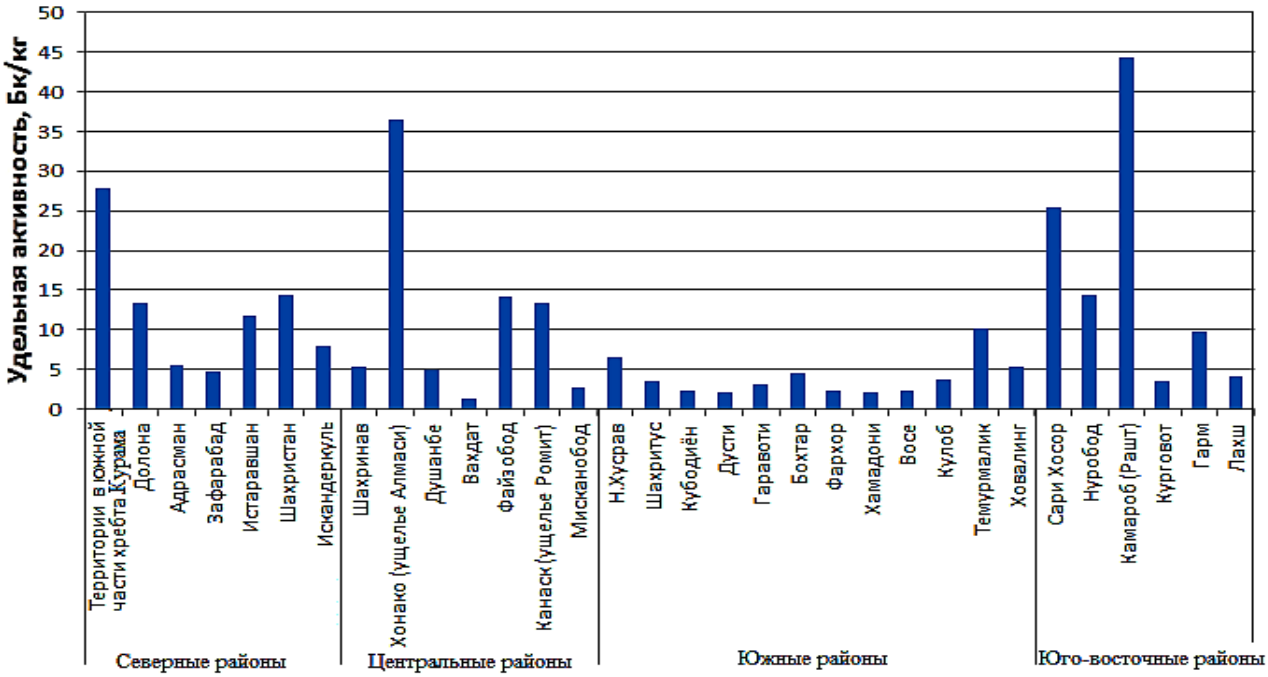


Рис. 3. Гистограмма распределения цезия-137 в почвенном покрове различных территорий Таджикистана.

Из гистограммы рис. 3 видно, что распределение цезия-137 в районах Таджикистана разное. Максимальная средняя УА цезия-137 наблюдается в почвах гористой местности районов Раштской зоны и территории Сари Хосора (юго-восточная часть Таджикистана), Хонако в зоне ущелья Алмасы (Центральный Таджикистан), а также на территории в южной части Кураминского хребта (Северный Таджикистан). В результате атмосферных осадков и песчаной мглы, так называемого «Афганца»,

идущих со стороны юга и юго-востока, цезий-137 оседает на вершинах гор, и за счёт водной и ветровой эрозии и селевых потоков накапливается у их подножия, о чём свидетельствуют высокие показатели УА в пробах, отобранных у подножия гор.

Максимальное значение УА цезия-137 наблюдается в местности Камароб Раштского района и составляет 147.5 Бк/кг (юго-восток), а среднее значение в этом районе составляет 44.4 Бк/кг. Минимальное значение средней УА цезия-137 отмечено в городе Вахдат (1.3 Бк/кг) [4]. Возможно это связано с тем, что Вахдат находится на более низком уровне, чем остальные районы.

Поступило 18.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Белоусов И.М. Естественная радиоактивность – М.: Медгиз, 1961.
2. Муминов С.В., Мирсаидов И.У., Баротов Б.Б., Бахронов С.М., Мирсаидов У.М. Накопление изотопа цезия-137 в почве за счёт атмосферных выпадений на юго-западе Таджикистана – Мат-лы II Междунар. научн. форума «Ядерная наука и технологии». – Алматы, 2019, с.177-178.
3. Муминов С.В., Баротов Б.Б., Хамидов Ф.А., Бобоёров М.Д., Мирсаидов И.У. Радионуклиды в строительных материалах Таджикистана. – Сборник мат-лов XV Нумановских чтений «Современное состояние химической науки и использование ее достижений в народном хозяйстве РТ». – Душанбе, 2019, с.167-169.
4. Муминов С.В., Баротов Б.Б., Хамидов Ф.А., Шоназаров А.А., Баротов М.А. Радиационный мониторинг территории Пункта хранения радиоактивных отходов. – Сборник мат-лов XV Нумановских чтений «Современное состояние химической науки и использование ее достижений в народном хозяйстве РТ». – Душанбе, 2019, с.171-173.

Ш.Муродзода (Ш.Р.Муродов), С.В.Муминов, И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов), И.Ф.Раҳимов

РАДИОНУКЛИДҲО ДАР ХОКҲОИ ТОҶИКИСТОН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон

Миқдори радионуклидҳои табиӣ дар хокҳои Тоҷикистон дар мисоли сезий-137 омӯхта шуд. Қимати максималии фаъолнокии хоси сезий-137 дар минтақаҳои Камароб, ноҳияи Рашт, ки 147.5 Бк/кг-ро ташкил дод, мушоҳида карда шуд

Калимаҳои калидӣ: *радионуклидҳо, изотоп, сезий-137, хок, фаъолнокии хос.*

Sh.Murodzoda (Sh.R.Murodov), S.V.Muminov, I.Mirsaidzoda (I.U.Mirsaidov), I.F.Rahimov

RADIONUCLIDES IN THE SOILS OF TAJIKISTAN

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Safety and Security Agency, NAS of Tajikistan

The content of natural radionuclides in the soils of Tajikistan was studied using cesium-137 as an example. The highest specific activity values of cesium-137 were observed in the Kamarob area of the Rasht district, amounting to 147.5 Bq/kg.

Key words: *radionuclides, isotope, cesium-137, soil, specific activity.*

Сведения об авторах

1. **Муродзода Шохин** – Агентство по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: sh.murodov@cbrn.tj;
2. **Муминов Сафарали Валиевич** – кандидат технических наук, Агентство по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана, начальник отдела ядерной и радиационной безопасности. E-mail: s.muminov@cbrn.tj;
3. **Мирсаидзода Илхом** – доктор технических наук, профессор, Агентство по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана, директор. E-mail: i.mirsaidzoda@cbrn.tj;
4. **Рахимов Исматулло Фатхуллоевич** – доктор медицинских наук, профессор, Агентство по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: rif-52@bk.ru;

ЭКОЛОГИЯ

УДК 544.02÷502.2.05:54-78÷351.853.1
Специальность: 1.5.15. Экология

С.В.Муминов, Ф.Мухидинова, М.А.Зоитова, Ф.А.Хамидов, И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов)

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ТУРИСТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ «ЧИЛУЧОР ЧАШМА» НОСИР-ХУСРАВСКОГО РАЙОНА ТАДЖИКИСТАНА

Национальная академия наук Таджикистана,
Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана

(Представлено академиком НАН Таджикистана У.Мирсаидовым 10.06.2025 г.)

Проведены измерения радиационного фона на территории туристической зоны «Чилучор Чашма» Носир-Хусравского района Таджикистана. Так же изучено содержание естественных радионуклидов в почвах территорий, прилегающих к объекту. Определены суммарные альфа- и бета-активности в пробах вод из водных источников внутри этой зоны.

Ключевые слова: *мониторинг, почва, удельная активность, естественная радиоактивность, радионуклиды, Чилучор Чашма.*

Наряду с величественными горами, чистыми озерами и древними традициями, Таджикистан славится богатыми запасами целебных минеральных вод. В этих местах со временем возвели курорты, куда подлечить здоровье приезжают и сами таджикистанцы, и иностранные гости. Одним из таких мест считается «Чилучор Чашма» Носир-Хусравского района Хатлонской области Таджикистана, название которого переводится как «Сорок четыре родника».

В «Чилучор Чашме» из-под земли бьют 5 больших источников, которые потом распадаются на 39 мелких. Воды этих источников, насыщенные различными минералами и микроэлементами, используются местными жителями для лечения различных заболеваний. Как известно, природные воды, грунтовые и родниковые, наряду со следами других минералов всегда содержат естественные радиоактивные вещества . Это особенно касается минеральных вод, поскольку они часто добываются из очень глубоких залежей и поэтому имеют более высокую степень минерализации. В зависимости от местных гидрогеологических условий и различного содержания урана и тория в коренных породах, концентрации активности естественных радионуклидов в минеральной воде из цепочек радиоактивного распада урана и тория, таких как: уран-238, уран-235, уран-234, радий-226, радий-228, свинец-210, полоний-210 и актиний-227, сильно различаются. Поэтому в последние годы этими объектами часто интересуются учёные и специалисты для изучения и оценки радиационной безопасности, так как излучения от этих объектов могут внести весомый вклад в общую годовую дозу посетителей таких туристических зон.

Адрес для корреспонденции: *Хамидов Фарход Абдуфатохович, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33, Агенство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана. E-mail: f.khamidov@cbrn.tj.*

В ранних работах [1-6] проводились радиоэкологические мониторинги некоторых территорий Республики Таджикистан, но именно радиационный фон в туристических зонах был мало изучен. Туристические зоны могут иметь уникальные экологические характеристики и потенциальные источники радиационного загрязнения, которые требуют внимательного изучения.

Данная работа была проведена с целью измерения радиационного фона, определения суммарной активности альфа- и бета-радионуклидов в воде, выявления радиационных аномалий и определения влияния объекта на облучение населения от естественных радионуклидов в туристической зоне «Чилучор Чашма». Естественные радионуклиды являются неотъемлемой составляющей природной среды обитания. Основные компоненты фоновых естественных радионуклидов, которые вносят вклад в формирование эффективной эквивалентной дозы фонового облучения человека, имеют космогенное и земное происхождение.

Материалы и методы измерения

Объектом исследования данной работы являлась туристическая зона «Чилучор Чашма» Носир-Хусравского района Хатлонской области Таджикистана. «Чилучор Чашма» является одним из знаменитых источников пресной воды в Хатлонской области. «Чилучор Чашма» является местом паломничества, где верующие молятся, совершают омовение, купаются в источниках и часто забирают воду с собой. Из 44 источников семнадцать обладают терапевтическими и лечебными свойствами. Не менее популярными считаются её целебные свойства, которые помогают от выпадения волос, заболеваний костей, гипертонии, мигрени, псориаза и многих других недугов.

Для исследования было отобрано 5 образцов воды согласно методике, из разных родниковых источников и 6 образцов почв внутри зоны для радионуклидного анализа. Отбор проб почвы проводили согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017 [3] от поверхности земли до глубины 25 см. Из общей массы методом квартования отбирали образцы объёмом более 1000 $см^3$.

Измерения концентрации активности естественных радионуклидов в отобранных пробах проводились спектрометрическим методом на приборе с помощью детектора Canberra High Purity Germanium (HPGe). Детектор был окружен массивным свинцовым экраном (10 см) с внутренними стенками из электролитической меди и кадмия. Система была откалибрована по энергии и эффективности с использованием стандартных источников, предназначенных для измерения энергий, испускаемых радионуклидами квантов рентгеновского или гамма-излучения, а также активности (удельной, объемной) гамма-излучающих радионуклидов в пробах и объектах, в соответствии с методикой выполнения измерений и с неопределённостью измерения до 12%. Собранные образцы сначала измельчали до состояния порошка, высушивали, взвешивали на электронных весах с точностью ±5 г, а затем надежно закрывали в геометрии сосуда Маринелли объемом 1000 $см^3$. Масса проб определялась взвешиванием герметично укупоренных проб, которые выдерживались в течение 30 суток с целью достижения равновесия Ra-226 с дочерними продуктами распада. По окончании этого периода образцы подсчитывали в течение одних суток.

Измерение радиационного фона осуществлялось откалиброванным дозиметрическим прибором Атомтех рюкзачного типа со сцинциляционным гамма-детектором. Гамма-съёмка проводилась пешим ходом внутри территории туристической зоны. На данном приборе результаты

измеренных мощностей доз от гамма-излучения с привязкой географических координат регистрируются автоматически. При обработке данных можно создать карты с указанием мест с фоновой радиацией и с повышенной мощностью дозы.

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения мощности дозы гамма-излучения проводились внутри территории исследуемого объекта (рис.1).

Рис. 1. Точки измерения радиационного фона ( ), отбора проб почв ( ) и вод ( )

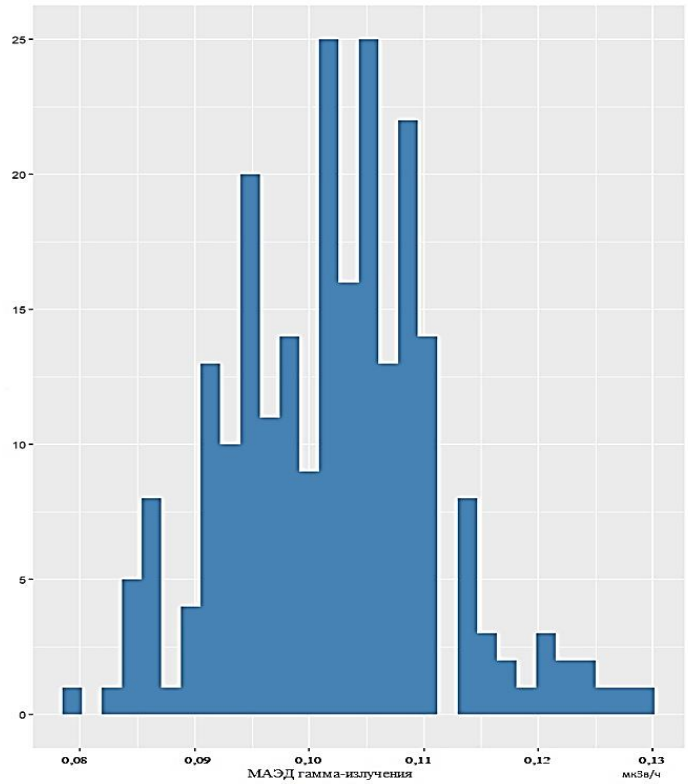


Рис. 2. Распределение уровней естественного радиационного фона на территории туристической зоны «Чилучор чашма».

Около 60% замеров показали фоновые уровни <110 нЗв/ч (рис. 2). Результаты измерений показали, что радиационный фон в этой местности стабилен и близок к среднему радиационному фону Республики Таджикистан. Во время измерений точек с аномальными значениями мощности дозы гамма-излучения не обнаружено. Измерения показали, что мощность дозы гамма-излучения на этом участке равна от 0.08 до 0.13 мкЗв/ч, что меньше среднего радиационного фона по Таджикистану.

Отобранные пробы почвы внутри зоны (рис. 1) были проанализированы на содержание радионуклидов. Гамма-спектрометрический анализ проб показал, что они содержат природные радионуклиды в допустимых количествах (табл.1).

Таблица 1

Среднее содержание радионуклидов в пробах почв туристической зоны «Чилучор Чашма» Носир-Хусравского района Таджикистана

Нуклид	Средневзвешенная активность, Бк/кг	Погрешность, Бк/кг
Ka-40	542.866	18.30
Bi-212	22.554	6.23
Pb-212	29.018	2.10
Bi-214	31.347	4.64
Pb-214	31.083	2.65
Pb-210	28.034	1.68
Ra-226	66.4798	3.02
Ac-228	32.885	1.171
U-238	23.002	2.53

В них доминируют изотопы К-40, Ra-226 и Ac-228. Пробы воды, взятые из пяти источников (рис. 1), были проанализированы на суммарную альфа- и бета-активность. Результаты анализов показали, что средная суммарная активность альфа- и бета-радионуклидов в этих пробах составляет 0.013±0.002 Бк/л и 0.009±0.0003 Бк/л соответственно и не превышает установленных норм [7].

З а к л ю ч е н и е

При проведении измерений радиационного фона и определения суммарной активности альфа- и бета-радионуклидов в воде родниковых источников туристической зоны «Чилучор Чашма» Носир-Хусравского района Хатлонской области Таджикистана анамальных точек не выявлено. Содержания естественных радионуклидов в почвах внутри объекта соответствуют природному фону для данной местности. Суммарные альфа- и бета-активности в пробах вод не превышают установленных норм. Территория туристической зоны «Чилучор Чашма» с радиационной точки зрения безопасна для населения и туристов.

Поступило 10.06.2025 г.

Л И Т Е Р А Т У Р Ы

1. Mirsaidov U.M., Nazarov Kh.M., Shosafarova Sh.G., Mahmudova M.M. Radon monitoring in the territory of Tajikistan. – International Conference on Radiation Safety, Vienna, 2020, pp. 25-28.
1. Муминов С.В., Баротов Б.Б., Мирсаидов У.М., Муродов Ш.Р., Саломов Д.А., Мирсаидзода И. Содержание цезия-137 в почвенном покрове Центрального и Южного Таджикистана – Радиационная гигиена (С.-Петербург), 2021, №2, с.66-71.

2. Ахмедов М.З. Содержание изотопа Цезия-137 в почвенном покрове Северного Таджикистана – Доклады НАН Таджикистана, 2022, т. 65, №9-10, с. 658-665.
3. Мирсаидзода И. (Мирсаидов И.У.), Хамидов Ф.А., Муродов Ш.Р., Маджидов Н.М., Пулатов Э.Х., Рахматшоев С.С. Радиационное обследование историко-археологического заповедника «Саразм» Пенджикентского района Таджикистана – Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хисрава. Серия естественных наук, 2024, №2/3 (126), с. 20 -24.
4. Муродов Ш.Р., Мухидинова Ф., Рахматшоев С.С., Баротов Б.Б., Мирсаидзода И. Проведение радиоэкологического мониторинга на историческом объекте Аджинатеппа в районе Кушониён Таджикистана. – Доклады НАН Таджикистана, 2023, т. 66, №11-12, с. 685-689.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-24), Утверждены приказом директора Агентства по ХБРЯ безопасности НАН Таджикистана от 13.05.2024 г. №83, Зарегистрировано в Министерстве юстиции РТ 25.10.2024 г, регистрационный №1310.

С.В.Муминов, Ф.Мухидинова, М.А.Зоитова, Ф.А.Хамидов, И.Мирсаидзода (И.У.Мирсаидов)

ВАЗЪИ РАДИОЛОГИИ МИНТАҚАИ САЙЁҲИИ «ЧИЛУЧОРЧАШМА»-И НОҲИЯИ НОСИР-ХУСРАВИ ЧУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,

Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИ Тоҷикистон

Дар минтақаи сайёҳии «Чилучорчашма»-и ноҳияи НосириХусрави Ҷумҳурии Тоҷикистон ченкунии фони радиатсионии гузаронида шуд. Инчунин мавҷудияти радионуклидҳои табиӣ дар хокҳои гирду атрофи ин объект омӯхтааст.

Калимаҳои калидӣ: *мониторинг, хок, фаъолнокии хос, радионуклидҳо, Чилучорчашма.*

S.V.Muminov, F.Mukhidinova, M.A.Zoitova, F.A.Khamidov, I.Mirsaidzoda (I.U.Mirsaidov)

RADIOLOGICAL SITUATION IN THE TOURIST AREA "CHILUCHOR CHASHMA" OF THE NOSIR-KHUSRAV DISTRICT OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

National Academy of Sciences of Tajikistan,

Agency for Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety, NAS of Tajikistan

Measurements of the background radiation in the tourism area "Chiluchor Chashma" of the Nosir-Khusrav district of Republic of Tajikistan were carried out. The content of natural radionuclides in the soils of the territories adjacent to the site was also studied.

Key words: *monitoring, soil, specific activity, radionuclides, Chiluchor Chashma.*

Сведения об авторах:

1. **Муминов Сафарали Валиевич** – кандидат технических наук, Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, заведующий Отдела ядерной и радиационной безопасности. E-mail: s.muminov@cbrn.tj$
2. **Мухиддинова Фарзона Саидахматовна** – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: f.muhiddinova@cbrn.tj;
3. **Зоитова Манижа Алишеровна** – Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, заведующий Отдела контроля профессионального, медицинского облучения и облучение населения. E-mail: m.zoitova@cbrn.tj;
4. **Хамидов Фарход Абдуфатохович** – кандидат технических наук, Агентство по химической, биологической, и радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, директор Регионального центра ХБРЯ. E-mail: f.khamidov@cbrn.tj;
5. **Мирсаидзода Илхом (Мирсаидов Илхом Улмасович)** – доктор технических наук, профессор, Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана, директор. E-mail: i.mirsaidzoda@cbrn.tj.