

**П.С. Дмитриев\*, И.А. Фомин, И.Н. Катаева, И.А. Зубань, Т.Р. Накиев**  
Северо-Казахстанский университет им. М.Козыбаева,  
Республика Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86  
\*e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ САПРОПЕЛЕВОГО УДОБРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Аннотация:** Получение сапропелевого удобрения является многостадийным процессом, что требует учета влияния различных параметров на выход конечного продукта. В связи с этим возникла необходимость оптимизировать режимы получения сапропелевого продукта из донных отложений эвтрофных озер. С применением ультразвукового воздействия в технологии получения сапропеля, заключающегося в экстрагировании донных отложений водой, разделении, фильтрации и концентрировании готового продукта. Проведен анализ влияния продолжительности экстракции, скорости перемешивания, температуры и массового соотношения фаз донной суспензии на концентрацию раствора. Доказано, что применение ультразвуковой кавитации на стадии экстрагирования увеличивает выход сапропелевого продукта в 1.7. раза. Выведенные математические модели процессов получения сапропелевого продукта при квантовом воздействии и в отсуствии его позволяют определить оптимальные входные параметры для обеспечения максимального выхода сапропелевого продукта. С практической точки зрения это положительно повлияет на качество полученного инновационного экологически чистого сапропелевого удобрения. В свою очередь это проявится в большей эффективности предпосевной обработке семян, посредством увеличения качественных и количественных свойств питательных элементов, содержащихся в сапропелевом удобрении. Что впоследствии отразится на более высокой урожайности сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** озера Северо-Казахстанской области, природные ресурсы, устойчивость, сапропель, технология получения.

### **Введение**

Озера Северного региона уникальны с точки зрения природно-ресурсного потенциала, имеют органоминеральные отложения, которые также характеризуются высокими химическими показателями, для их использования в качестве удобрения, стимулятора роста и пр. Местные озерные илы могут обеспечить семенной материал веществами органического и минерального происхождения для ускорения вегетационных процессов, посредством использования зеленых технологий [1-4].

Исходя из анализа природно-ресурсного потенциала и принципов зеленой экономики, выявлено, что рациональное использование природных ресурсов будет способствовать развитию зеленых технологий и органического земледелия региона. Предлагаемая «зеленая» технология получения и применения удобрения на основе использования органоминеральных накоплений озер региона направлена на производство экологически чистой продукции, повышение урожайности при минимальных затратах [5].

Результаты применения жидкой концентрированной фракции полученного органоминерального удобрения, в предпосевной обработке семян показали хорошую эффективность. Предлагаемая технология получения варьированной жидкой фракции, путем уменьшения или увеличения ее концентрации, является особенностью данной разработки. Технологической особенностью методики, является получение сапропелевого продукта двумя способами, с использованием ротационного испарителя, и дополнительно с использованием ультразвуковой ванны. Это позволило определить эффективность получения продукта с максимальным выходом органических и минеральных веществ, а также с наименьшими затратами энергии и времени, при создании математической модели [6, 7].

Целью исследования является создание математической модели получения инновационного удобрения на основе использования органоминеральных накоплений озер Северо-Казахстанской области, изучения технологических способов получения и оптимизация составов.

## Методы исследования

Метод получения сапропелевого продукта включал стадии смешения донных отложений с водой, экстрагирования при перемешивании полученной суспензии, отделении жидкой фазы.

В рамках проводимых исследований использовали статистические методы обработки результатов и вероятностно-детерминированный метод планирования (ВДП) эксперимента. Это позволило на последнем этапе работ вывести математическую модель процесса получения сапропелевого продукта, научно-обоснованно установить значения режимов и оптимизировать процесс получения сапропелевого продукта из донных отложений. В качестве входных параметров, влияющих на процесс извлечения сапропелевого продукта из донных отложений, использовали: массу исходного сырья (донных отложений), время перемешивания донных отложений с водой, число оборотов импеллерной мешалки и температуру в смесителе [8-10].

На основе использования принципов вероятностно-детерминированного моделирования, предпринята попытка вывода многофакторной модели процесса выделения сапропелевого продукта из донных отложений в условиях ультразвуковой кавитации. В работе использовали донные отложения оз. Пеньковское (54°58'2.26" с.ш., 69°15'35.20" в.д.) Северо-Казахстанской области, дистиллированную воду ( $\chi = 4-10$  мкСм).

В соответствии с методикой вероятностно-детерминированного планирования для системы «донные отложения-вода» были составлены две план-матрицы четырехфакторного эксперимента на трех уровнях, числовые значения уровней для каждого фактора представлены в таблице 1 и 2. В случае активного эксперимента в условиях ультразвукового воздействия опыты проведены при постоянстве частоты ультразвука 40kHz, мощностью 600W. Процесс экстракции изучался в зависимости от влияния следующих факторов: температура процесса экстракции ( $t$ , °C), продолжительность перемешивания суспензии ( $t$ , мин), количество оборотов импеллерной мешалки ( $N$ , обр/мин), массовая доля донных отложений в водной суспензии ( $W$ , доля ед.).

Таблица 1 – Числовые значения уровней для каждого фактора в условиях действия ультразвука

Уровень	Значение фактора			
	W	t, мин	N, обр/мин	t, °C
1	0,50	15	0	20
2	0,56	30	300	30
3	0,60	45	600	40

Таблица 2 – Числовые значения уровней для каждого фактора в условиях отсутствия ультразвукового воздействия

Уровень	Значение фактора			
	W	t, мин	N, обр/мин	t, °C
1	0,50	15	300	20
2	0,67	30	600	30
3	0,75	45	900	40

Активный эксперимент проводили согласно матрице четырехфакторного эксперимента на трех уровнях, которую отражает таблица 3.

Таблица 3 – Матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях в общем виде

N опыта	W	t, мин	N, обр/мин	t, C
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Выборку экспериментальных данных из экспериментального массива проводили согласно таблице 4.

Таблица 4 – Выборка функции отклика из план-матрицы

Уровни фактора W	Выборка	Уровни фактора t, мин	Выборка	Уровни фактора N	Выборка	Уровни фактора t, С	Выборка
1	$\frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_4 + y_7}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_6 + y_8}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_5 + y_9}{3}$
2	$\frac{y_4 + y_5 + y_6}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_5 + y_8}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_4 + y_9}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_4 + y_9}{3}$
3	$\frac{y_7 + y_8 + y_9}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_6 + y_9}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_5 + y_7}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_5 + y_7}{3}$

Массу воды в опытах задавали постоянно 400 г. Опыты проводили в термостатируемом режиме в стеклянном стакане на 2000 мл с калибровочной шкалой в который помещали 400 г воды и массу донных отложений, взвешенную на технических весах HIWEIGH X1S с погрешностью до 1 г. В случае активного эксперимента с кавитацией стакан с суспензией помещали в ультразвуковую ванну Stegler 22DT с установленной температурой и временем ультразвукового воздействия. Суспензию перемешивали в течение заданного времени, в соответствии с условиями матричных опытов. Перемешивание суспензии осуществлялось верхнеприводной мешалкой US-2200D, которая позволяет регулировать скорость перемешивания.

По завершению процесса для удаления нерастворимых твердых частиц суспензию количественно переносили на комплект сит с размером 3,5 мм, 1,6x20 мм, 1,5x20 мм, 0,14 мм. Затем проводили центрифугирование на лабораторной центрифуге UC-1536E при 5000 оборотах в течении 5 мин. Во всех опытах раствор после центрифугирования доводили до постоянного объема 250 мл в мерной колбе. В случае получения объема больше 250 мл раствор после центрифугирования предварительно концентрировали на лабораторном ротационном испарителе DLAB RE100-Pro с вакуумным насосом.

В качестве функции отклика использовали концентрацию полученных растворов (С, г/дм<sup>3</sup>). Для этого рассчитывали массу твердого вещества (органической и неорганической части донных отложений) в одном литре раствора. Общую массу органических и неорганических компонентов в фильтрате определяли весовым методом, путем упаривания досуха на нагревательной плите УН-2840А 5 мл раствора из мерной колбы и взвешивания сухого остатка на аналитических весах (до 0,0001 г).

Для построения многофакторной статистической математической модели (обобщенного уравнения) использовали предложенную М.М. Протождяконовым формулу, которая в случае четырехфакторного эксперимента принимает вид (Формула 1):

$$y = \frac{f(m_1) \cdot f(m_2) \cdot f(m_3) \cdot f(m_4)}{g_{cp}^{m-1}}, \quad (1)$$

где  $f(m_1)$ ,  $f(m_2)$ ,  $f(m_3)$ ,  $f(m_4)$  – зависимость функции отклика от фактора  $m_i$ ;  $g_{cp}$  – среднее значение фактической величины выходного параметра (y) для всех n экспериментов (генеральное среднее); m – количество факторов.

Значения  $g_{cp}$  были рассчитаны по формуле 2:

$$g_{cp} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (2)$$

где  $\sum y_i$  – совокупность экспериментальных данных в матрице; n – общее число опытов в план-матрице.

Оценку точности полученных аппроксимированных уравнений и полученных математических моделей оценивали с помощью используемых в методе ВДП коэффициентов корреляции (R) и значимости ( $t_R$ ), рассчитанных по уравнению (3) и уравнению (4).

$$R = \sqrt{1 - \frac{(n-2) \cdot \sum (y_s - y_m)^2}{(n-1) \cdot \sum (y_s - y_{cp})^2}}, \quad (3)$$

где n – количество опытов;  $y_s$  – экспериментальное значение функции отклика;  $y_t$  – теоретическое значение функции отклика;  $y_{cp}$  – среднее значение функции отклика.

$$t_R = \frac{R \sqrt{(n-2)}}{1-R^2} \quad (4)$$

## Результаты исследований

Результаты взвешивания сухого остатка и концентрация полученных растворов в рамках матриц четырехфакторного эксперимента на трех уровнях отражает таблице 5.

Таблица 5 – Результаты активного эксперимента в условиях ультразвука и без него

№ опыта	Без ультразвука		С ультразвуком	
	Масса осадка, г	$C_{pc}$ , г/дм <sup>3</sup>	Масса осадка, г	$C_{pc}$ , г/дм <sup>3</sup>
1	0,0103	2,060	0,0167	3,34
2	0,0203	4,060	0,0240	4,80
3	0,0107	2,140	0,0176	3,52
4	0,0107	2,140	0,0183	3,66
5	0,0080	1,600	0,0168	3,36
6	0,0093	1,860	0,0171	3,42
7	0,0096	1,920	0,0167	3,34
8	0,0084	1,680	0,0197	3,94
9	0,0100	2,000	0,0183	3,66

На основе выборки экспериментального массива данных строили графические зависимости функции отклика от каждого фактора, представленные на рисунке 1.

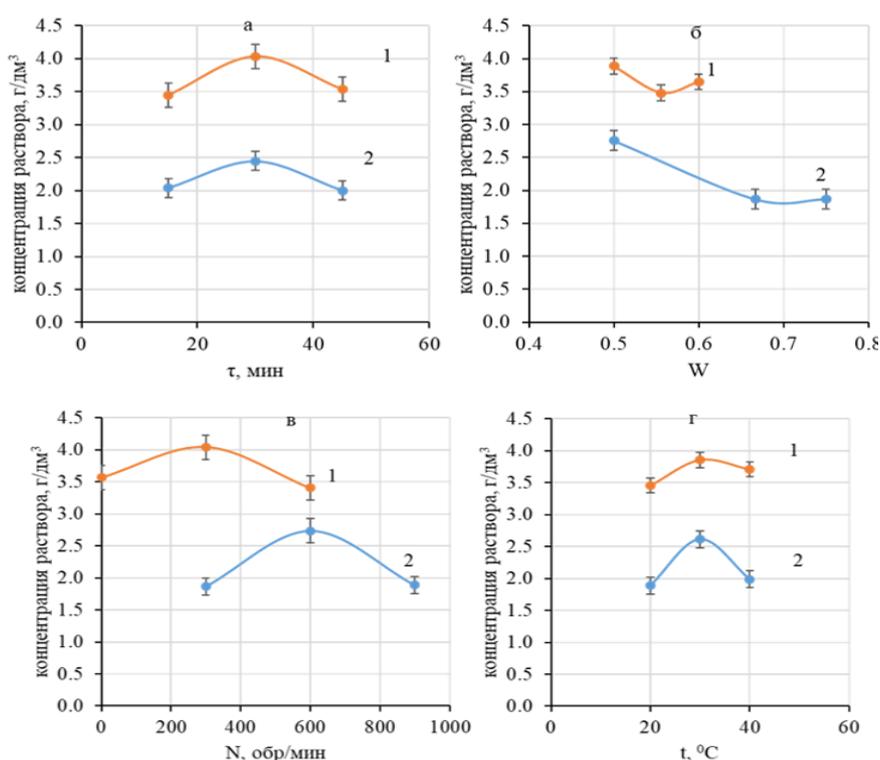


Рисунок 1 – Частные зависимости изменения общего содержания органической и минеральной части донных отложений от массовой доли отложений (а), времени перемешивания смеси (б), скорости перемешивания (в) и температуры (г)  
1 – частоты ультразвука 40kHz и мощностью 600W, 2 – без воздействия ультразвука

Из анализа частных зависимостей рисунка 1 следует, что концентрация сапропелевого продукта уменьшается с увеличением содержания донных отложений в суспензии (рис. 1б, линия 1). Максимальная концентрация сапропелевого продукта 3,88 г/дм<sup>3</sup> наблюдается при массовой доле донных отложений меньше 0,55. При увеличении содержания твердой фазы в суспензии выход органической и неорганической часть отложений замедляется, и концентрация сапропелевого продукта стабилизируется на уровне 3,4-3,6 г/дм<sup>3</sup>.

Зависимости скорости седиментации частиц от продолжительности перемешивания суспензии (рис. 1б), скорости перемешивания (количество оборотов импеллерной мешалки) (рис. 1в) и температура процесса экстракции (Рисунок 1г) имеют экстремумы на графических

зависимостях. Максимальное содержание веществ в растворе находится в точках  $t=30$  мин,  $N = 300$  обр/мин,  $t=30$  °C. Соответственно 4,033, 4,040 и 3,853 г/дм<sup>3</sup>. По результатам проведенных предварительных опытов можно заключить, что оптимальные режимные параметры получения водного раствора сапропелевого продукта, обеспечивающие максимальный выход органической и неорганической части донных отложений оз. Пеньковское соответствуют  $W=0,5$ ,  $t=30$  мин,  $N = 300$  обр/мин,  $t=30$  °C.

Исследования показали, что полученные значения концентрации сапропелевого продукта при ультразвуковом воздействии на донные отложения в процессе экстракции в 1,7 раза выше, чем в аналогичных опытах без ультразвука. Указанный эффект указывает на перспективность применения кавитационных процессов в методе получения сапропелевого продукта.

На последнем этапе осуществляли аппроксимацию частных зависимостей с получением однопараметрических уравнений  $y = f(m_i)$ , характеризующих влияние на функцию отклика каждого фактора в отдельности [11-13].

Частные зависимости аппроксимировали с использованием стандартных пакетов программ «Microsoft Excel» «Advanced Grapher». Полученные однопараметрические уравнения объединяли в обобщенные математические модели с учетом формулы Протодьяконова. В условиях ультразвукового воздействия формула (5), в отсутствие ультразвука формула 6

$$C = \frac{\left[ (110,7W^2 - 124,17W + 38,297)(-0,0024t^2 + 0,1478t + 1,7733)x \right]}{3,6711^3} \quad (5)$$

$$C = \frac{\left[ (20,863m_c^2 - 29,625m_c + 12,35)(-0,0019\tau^2 + 0,1124\tau + 0,78)x \right]}{2.162^3} \quad (6)$$

На основе решения обобщенного уравнения установили, что при оптимальных условиях процесса получения сапропелевого продукта с использованием ультразвука [14-16] максимальный выход экстрактивных веществ в воду составит 5 г/дм<sup>3</sup>. При оптимальных условиях процесса получения сапропелевого удобрения без ультразвука максимальный выход экстрактивных веществ в воду составит 4,44 г/дм<sup>3</sup> (г/л). Полученные результаты были использованы при лабораторных и полевых исследованиях [17-18].

### Заключение

Таким образом, построены две математические модели оптимальных составов инновационного удобрения, которые позволят обеспечить максимальную урожайность. В основе модели лежит: подбор количества реагентов, продолжительность процесса и метода экстракции, содержание твердой фазы в суспензии дает возможность максимально увеличить эффективность получения продукта, его качественные характеристики с наименьшими затратами энергии и времени. На основании результатов, проведен вывод уравнений, получения сапропелевого удобрения двумя способами, в условиях ультразвукового воздействия и без него. Математическая модель позволяет рассчитать значения концентрации готового сапропелевого продукта, до процесса концентрирования на роторном испарителе при различных режимных параметрах. На основе решения обобщенного уравнения установлено, что получение сапропелевого продукта с использованием ультразвука обеспечивает максимальный выход экстрактивных веществ в воду. Следовательно, в сапропелевом продукте, полученном с использованием ультразвука, выше выход минеральных и органических веществ. Это, в свою очередь, повлияет на качество предпосевной обработке семян при использовании инновационного удобрения.

### Список литературы

1. Deryagina M.S. Determination of Humic Acid Content in Sapropel / M.S. Deryagina, O.M. Konyukhova // BIO Web of Conferences. – 2023. – P. 57. <http://doi.org/10.1051/bioconf/20235706002>.

2. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances / I. Pavlovskaya et al // *Sci. Rep.* – 2020. – №10. – P. 21527. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78498-6>.
3. Hydrography, hydrochemistry and composition of sapropel of Shatsk Lakes / V. Khilchevskiy et al // *Journal of Water and Land Development.* – 2022. – № 54(VII-IX). – P. 184-193. <http://doi.org/10.24425/jwld.2022.141571>.
4. Hadartsev A. Chemical composition and biological activity of sapropel in the Orenburg region (V. Sol-Ilets'k), genetic link with the composition of the sapropel formers / A. Hadartsev, V. Platonov, K. Fridzon // *J of New Med. Technologies. eJournal.* – 2014. – № 8. – P. 1-8. <http://doi.org/10.12737/5040>.
5. Особенности химического состава и получения сапропеля эвтрофных озер Северо-Казахстанской области / П.С. Дмитриев и др. // *Вестник Университета Шакарима.* – 2024. – № 2(14). – С. 519-527. [http://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2\(14\)-62](http://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-62).
6. Пат. 8929 Республика Казахстан, 2023/1145.2. Способ получения сапропелевого продукта для предпосевной обработки семян овощных культур / П.С. Дмитриев и др.; заявл. 18.11.2023; опубл. 22.11.2024.
7. Study of the Possibility of Using the Bottom Organomineral Accumulations of the Lakes of the North Kazakhstan Region to Obtain Innovative Fertilizers for the Development of Organic Farming and Agrotourism / P. Dmitriyev et al // *Sustainability.* – 2023. – № 15. – P. 8999. <https://doi.org/10.3390/su15118999>.
8. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Киев: ОКО, 2000. – 898 с.
9. Витенько Т.Н. Массообмен при растворении твердых тел с использованием гидродинамических кавитационных устройств / Т.Н. Витенько // *Теор. основы хим. технологии.* – 2006. – Т. 40, № 6. – С. 639-644.
10. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение – 1, – 2001. – 260 с.
11. Свойства и эффекты кавитации / Ю.М. Аверина и др. // *Успехи в химии и химической технологии.* – 2018. – № 14(210). – С. 37-39 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-i-effekty-kavitatsii>.
12. Нигматов А.Н. Математическое моделирование в экологии / А.Н. Нигматов, Г.Н. Назарова // *Евразийский Союз Ученых.* – 2018. – № 3-2(48). – С. 48-50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-ekologii>.
13. Шемелова О.В. Математическое моделирование в процессах химической технологии / О.В. Шемелова // *Бюллетень науки и практики.* – 2018. – № 12. – С. 12-23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-protsessah-himicheskoy-tehnologii>.
14. Ханбердиева Б. Математические модели в химической инженерии: передовые технологии и применение / Б. Ханбердиева, Г. Алланазарова, Б. Сатдыев // *Вестник науки.* – 2024. – № 4(73). – С. 592-595 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-v-himicheskoy-inzhenerii-peredovye-tehnologii-i-primenenie>.
15. Гумеров, А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие / А.М. Гумеров. – 2-е изд., перераб. – Санкт-Петербург: Лань, 2014. – 176 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/41014>.
16. Математическое моделирование в химико-технологических процессах и подготовке инженеров: история и современность / Э.К. Ахтямов и др. // *История и педагогика естествознания.* – 2021. – № 1-2. – С. 14-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-himiko-tehnologicheskikh-protsessah-i-podgotovke-inzhenerov-istoriya-i-sovremennost>.
17. Effect of the use of sapropel extract on biometric indicators and yield of beetroot (*Beta vulgaris* L.) in the conditions of the North Kazakhstan region / P. Dmitriyev et al // *Sustainability.* – 2024. – № 16(14). – P. 6192. <https://doi.org/10.3390/su16146192>.
18. The Possibility of Environmentally Sustainable Yield and Quality Management of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Cornetto Variety When Using Sapropel Extract / P. Dmitriyev et al // *Sustainability.* – 2024. – № 16. – P. 9870. <https://doi.org/10.3390/su16229870>.

## References

1. Deryagina M.S. Determination of Humic Acid Content in Sapropel / M.S. Deryagina, O.M. Konyukhova // BIO Web of Conferences. – 2023. – R. 57. <http://doi.org/10.1051/bioconf/20235706002>. (In English).
2. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances / I. Pavlovska et al // Sci. Rep. – 2020. – №10. – R. 21527. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78498-6>. (In English).
3. Hydrography, hydrochemistry and composition of sapropel of Shatsk Lakes / V. Khilchevskiy et al // Journal of Water and Land Development. – 2022. – № 54(VII-IX). – R. 184-193. <http://doi.org/10.24425/jwld.2022.141571>. (In English).
4. Hadartsev A. Chemical composition and biological activity of sapropel in the Orenburg region (V. Sol-Iletsk), genetic link with the composition of the sapropel formers / A. Hadartsev, V. Platonov, K. Fridzon // J of New Med. Technologies. eJournal. – 2014. – № 8. – R. 1-8. <http://doi.org/10.12737/5040>. (In English).
5. Osobennosti khimicheskogo sostava i polucheniya sapropelya ehvтроfnykh ozer Severo-Kazakhstanskoi oblasti / P.S. Dmitriev i dr. // Vestnik Universiteta Shakarima. – 2024. – № 2(14). – S. 519-527. [http://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2\(14\)-62](http://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-62). (In Russian).
6. Pat. 8929 Respublika Kazakhstan, 2023/1145.2. Sposob polucheniya sapropelevogo produkta dlya predposevnoi obrabotki semyan ovoshchnykh kul'tur / P.S. Dmitriev i dr.; zayavl. 18.11.2023; publ. 22.11.2024. (In Russian).
7. Study of the Possibility of Using the Bottom Organomineral Accumulations of the Lakes of the North Kazakhstan Region to Obtain Innovative Fertilizers for the Development of Organic Farming and Agrotourism / R. Dmitriyev et al // Sustainability. – 2023. – № 15. – R. 8999. <https://doi.org/10.3390/su15118999>. (In English).
8. Fedotkin I.M. Kavitatsiya, kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti. CH. II / I.M. Fedotkin, I.S. Gulyi. – Kiev: OKO, 2000. – 898 s. (In Russian).
9. Viten'ko T.N. Massoobmen pri rastvorenii tverdykh tel s ispol'zovaniem gidrodinamicheskikh kavitatsionnykh ustroystv / T.N. Viten'ko // Teor. osnovy khim. tekhnologii. – 2006. – T. 40, № 6. – S. 639-644. (In Russian).
10. Promtov M.A. Pul'satsionnye apparaty roturnogo tipa: teoriya i praktika / M.A. Promtov. – M.: Mashinostroenie – 1, – 2001. – 260 s. (In Russian).
11. Svoystva i ehffekty kavitatsii / YU.M. Averina i dr. // Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2018. – № 14(210). – S. 37-39 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-i-ehffekty-kavitatsii>. (In Russian).
12. Nigmatov A.N. Matematicheskoe modelirovanie v ehkologii / A.N. Nigmatov, G.N. Nazarova // Evraziiskii Soyuz Uchenykh. – 2018. – № 3-2(48). – S. 48-50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-ekologii>. (In Russian).
13. Shemelova O.V. Matematicheskoe modelirovanie v protsessakh khimicheskoi tekhnologii / O.V. Shemelova // Byulleten' nauki i praktiki. – 2018. – № 12. – S. 12-23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-protsessah-himicheskoy-tehnologii>. (In Russian).
14. Khanberdieva B. Matematicheskie modeli v khimicheskoi inzhenerii: peredovye tekhnologii i primeneniye / B. Khanberdieva, G. Allanazarova, B. Satdyev // Vestnik nauki. – 2024. – № 4(73). – S. 592-595 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-v-himicheskoy-inzhenerii-peredovye-tehnologii-i-primeneniye>. (In Russian).
15. Gumerov, A.M. Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie / A.M. Gumerov. – 2-e izd., pererab. – Sankt-Peterburg: Lan', 2014. – 176 s. URL: <https://e.lanbook.com/book/41014>. (In Russian).
16. Matematicheskoe modelirovanie v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh i podgotovke inzhenerov: istoriya i sovremennost' / EH.K. Akhtyamov i dr. // Istoriya i pedagogika estestvoznaniya. – 2021. – № 1-2. – S. 14-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-v-himiko-tehnologicheskikh-protsessah-i-podgotovke-inzhenerov-istoriya-i-sovremennost>. (In Russian).
17. Effect of the use of sapropel extract on biometric indicators and yield of beetroot (*Beta vulgaris* L.) in the conditions of the North Kazakhstan region / R. Dmitriyev et al // Sustainability. – 2024. – № 16(14). – R. 6192. <https://doi.org/10.3390/su16146192>. (In English).

18. The Possibility of Environmentally Sustainable Yield and Quality Management of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Cornetto Variety When Using SapropeL Extract / R. Dmitriyev et al // Sustainability. – 2024. – № 16. – R. 9870. <https://doi.org/10.3390/su16229870>. (In English).

**Информация о финансировании:** Исследование профинансировано Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта (грант № AP14869273) по теме «Разработка инновационной методики получения экологически чистого удобрения на основе рационального использования органоминеральных накоплений озер», и на основании Договора на реализацию научных, научно-технических проектов по грантовому финансированию № 236/30-22-24 от 18.10.2022.

**П.С. Дмитриев\*, И.А. Фомин, И.Н. Катаева, И.А. Зубань, Т.Р. Накиев**  
Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,  
150000, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ., Пушкин к-сі, 86  
\*e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru

### **УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ӘСЕР ЕТУ ЖАҒДАЙЫНДА САПРОПЕЛЬ ТЫҢАЙТҚЫШЫН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ**

Сапропель тыңайтқышын алу көп сатылы процесс болып табылады, ол әр түрлі параметрлердің соңғы өнімнің шығуына әсерін ескеруді талап етеді. Осыған байланысты эвтрофиялық көлдердің түбіндегі шөгінділерден сапропель өнімін алу режимдерін оңтайландыру қажет болды. Су түбіндегі шөгінділерді сумен экстракциялаудан, дайын өнімді бөлуден, сүзуден және шоғырландырудан тұратын сапропельді алу технологиясында ультрадыбыстық әсерді қолдану. Экстракция ұзақтығының, араластыру жылдамдығының, температураның және төменгі суспензия фазаларының массалық қатынасының ерітінді концентрациясына әсерін талдау жүргізілді. Экстракция сатысында ультрадыбыстық кавитацияны қолдану сапропель өнімінің шығымдылығын 1.7-де арттыратыны дәлелденді. рет. Сапропель өнімін түбіртек әсер еткенде және ол болмаған кезде алу процестерінің математикалық модельдері сапропель өнімінің максималды шығуын қамтамасыз ету үшін оңтайлы кіріс параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. Практикалық тұрғыдан алғанда, бұл алынған инновациялық экологиялық таза сапропель тыңайтқышының сапасына оң әсер етеді. Практикалық тұрғыдан алғанда, бұл алынған инновациялық экологиялық таза сапропель тыңайтқышының сапасына оң әсер етеді. Өз кезегінде, бұл сапропель тыңайтқышындағы қоректік заттардың сапалық және сандық қасиеттерін арттыру арқылы тұқымдарды егу алдындағы өңдеудің үлкен тиімділігінде көрінеді. Бұл кейіннен дақылдардың жоғары өнімділігіне әсер етеді.

**Түйін сөздер:** Солтүстік Қазақстан облысының көлдері, табиғи ресурстар, тұрақтылық, сапропель, алу технологиясы.

**P.S. Dmitriyev\*, I.A. Fomin, I.N. Kataeva, I.A. Zuban, T.R. Nakiev**  
Kozybaev university,  
86 Pushkin Street, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan, 150000  
\*e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru

### **OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING SAPROPEL FERTILIZER UNDER ULTRASONIC CONDITIONS**

The production of sapropel fertilizer is a multi-stage process, which requires taking into account the influence of various parameters on the yield of the final product. In this regard, it became necessary to optimize the modes of obtaining sapropel product from bottom sediments of eutrophic lakes. Using ultrasonic exposure in the technology of sapropel production, which consists in extracting bottom sediments with water, separating, filtering and concentrating the finished product. The analysis of the effect of the extraction duration, mixing rate, temperature and mass ratio of the phases of the bottom suspension on the concentration of the solution was carried out. It is proved that the use of ultrasonic cavitation at the extraction stage increases the yield of the sapropel product by 1.7 times. The derived mathematical models of the processes of obtaining a sapropel product under cavitation and in the absence of it allow us to determine the optimal input parameters to ensure maximum yield of the sapropel product. From a practical point of view, this will positively affect the quality of the resulting innovative environmentally friendly sapropel fertilizer. In turn, this will manifest itself in greater efficiency of pre-sowing seed treatment, by increasing the qualitative and quantitative properties of the nutrients contained in sapropel fertilizer. This will subsequently affect higher crop yields.

**Key words:** lakes of the North Kazakhstan region, natural resources, sustainability, sapropel, production technology.

### Сведения об авторах

**Павел Станиславович Дмитриев\*** – кандидат биологических наук, доцент, профессор кафедры «География и экология»; НАО СКУ им. М.Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2712-3508>.

**Иван Александрович Фомин** – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «География и экология»; НАО СКУ им. М.Козыбаева, Петропавловск, Казахстан; e-mail: iafomin@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9943-4914>.

**Ирина Николаевна Катаева** – магистрант кафедры «География и экология»; НАО СКУ им. М.Козыбаева, irina.kataeva.02@mail.ru, ORCID: 0009-0007-2995-4835.

**Иван Александрович Зубань** – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Биология»; НАО СКУ им. М.Козыбаева; e-mail: zuban\_ia@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0839-0085>.

**Талгат Рашитович Накиев** – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и химические технологии»; НАО СКУ им. М.Козыбаева talgat03021979@mail.ru, ORCID: 0009-0008-0115-8834.

### Авторлар туралы мәліметтер

**Павел Станиславович Дмитриев\*** – биология ғылымдарының кандидаты, доцент, «География және экология» кафедрасының профессоры; М. Қозыбаев атындағы СҚУ КЕАҚ., Петропавл, Қазақстан; e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2712-3508>.

**Иван Александрович Фомин** – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «География және экология» кафедрасының аға оқытушысы; М. Қозыбаев атындағы СҚУ КЕАҚ., Петропавл, Қазақстан; email: iafomin@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9943-4914>.

**Ирина Николаевна Катаева** – география және экология кафедрасының магистранты; М.Қозыбаев атындағы СҚУ КЕАҚ., Петропавл, Қазақстан; e-mail: irina.kataeva.02@mail.ru, ORCID: 0009-0007-2995-4835

**Иван Александрович Зубань** – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биология» кафедрасының аға оқытушысы; М.Қозыбаев атындағы СҚУ КЕАҚ., Петропавл, Қазақстан; e-mail: zuban\_ia@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0839-0085>.

**Талгат Рашитұлы Накиев** – техника ғылымдарының магистрі, «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы; М.Қозыбаев атындағы СҚУ КЕАҚ., Петропавл, Қазақстан; e-mail: talgat03021979@mail.ru, ORCID: 0009-0008-0115-8834

### Information about the authors

**Pavel Stanislavovich Dmitriyev\*** – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Ecology; Kozybaev university, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: dmitriev\_pavel@mail.ru, pdmitriev@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2712-3508>.

**Ivan Aleksandrovich Fomin** – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer of the Department of Geography and Ecology; Kozybaev university, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: iafomin@mail.ru, iafomin@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9943-4914>.

**Irina Nikolaevna Kataeva** – master's student of the Department of Geography and Ecology; Kozybaev university, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: irina.kataeva.02@mail.ru, ORCID: 0009-0007-2995-4835.

**Ivan Aleksandrovich Zuban** – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer of the Department of Biology; Kozybaev university, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: zuban\_ia@mail.ru. iazuban@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0839-0085>.

**Talgat Rashitovich Nakiev** – Master of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Chemistry and Chemical Technologies; Kozybaev university, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: talgat03021979@mail.ru, ORCID: 0009-0008-0115-8834.

*Поступила в редакцию 27.01.2025*

*Поступила после доработки 13.05.2025*

*Принята к публикации 14.05.2025*