

Оригинальная статья

УДК 532.5:004.05

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-92-97



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФЕРА И ОСАЖДЕНИЯ НАНОСОВ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ В РУСЛЕ КАНАЛА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РИГЕЛЕЙ

*Глазунова Ирина Викторовна*<sup>1✉</sup>, канд. техн. наук, доцент;  
Orchid 0000-0003-4931-2008; SPIN-код: 7508-2272, AuthorID: ivglazunova@mail.ru

*Редников Сергей Николаевич*<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доцент;  
Orchid 0000-0003-3435-7166; SPIN: 6267-1900, AuthorID: 119444; srednikov@mail.ru

*Нгуен Кхань Зуи*<sup>1,2</sup>, аспирант;  
SPIN-код: 7508-2272, AuthorID: 127917; Nguyenduy@tqu.edu.vn

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

<sup>2</sup> Провинция Тхенкуанг, район Йоншен, Коммуна Чунгмон, д. 4, Вьетнам

**Аннотация.** Цель работы заключалась в исследовании гидродинамики искусственных структур речных отложений в междуречье рек Ло и Кау (север Вьетнама) как инструмента процессов формирования гидродинамических и геохимических аномалий в водных объектах. Выполнены лабораторные исследования скоростей движения и осаждения взвешенных наносов по планированию эксперимента для серии использования естественных и искусственных ригелей при моделировании процессов транспорта и осаждения наносов. На основе лабораторного модельного эксперимента рекомендованы параметры ригелей при различных скоростях потока для условий равномерного движения воды в лотке и условий осаждения. Построены графики зависимостей скоростей движения и осаждения наносов, а также рассмотрены параметры вихревых потоков в зоне перед ригелями и после них. По результатам лабораторного моделирования построены графики-зависимости характеристик транзита и осаждения наносов с учетом влияния ригелей. В результате лабораторного моделирования получены данные для планирования дальнейших лабораторных и полевых экспериментов по транзиту наносов с плодородным илом, накоплению наносов в русле реки и влиянию естественных и искусственных ригелей на осаждение наносов, а также для формирования подвижных наносодерживающих плотин-перегородок. Планирование эксперимента выполнено по методике Х. Шенка. Обработка результатов эксперимента выполнена в программе MathCad и Solidworks.

**Ключевые слова:** естественные и искусственные ригеля, транзит наносов, осаждение наносов, вихревые потоки, лабораторное моделирование

**Формат цитирования:** Глазунова И.В., Редников С.Н., Нгуен Кхань Зуи. Экспериментальное определение характеристик трансфера и осаждения наносов при равномерном движении в русле канала с учетом влияния естественных и искусственных ригелей // Природообустройство. 2023. № 4. С. 92-97. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-92-97.

© Глазунова И.В., Редников С.Н., Нгуен Кхань Зуи., 2023

Original article

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSFER AND SEDIMENTATION UNDER UNIFORM MOVEMENT IN THE CHANNEL BED, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF NATURAL AND ARTIFICIAL CROSSBARS

*Glazunova Irina Viktorovna*<sup>1✉</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
Orchid 0000-0003-4931-2008, SPIN code: 7508-2272, author ID: 127917; ivglazunova@mail.ru

*Rednikov Sergey Nikolaevich*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;  
Orchid 0000-0003-3435-7166; SPIN: 6267-1900, AuthorID: 119444; srednikov@mail.ru

**Nguyen Khanh Zu**<sup>1,2</sup>, PhD student;

SPIN code:7508-2272, AuthorID:127917; Nguyenduy@tqu.edu.vn

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

Tuenkuang Province, Yongsheng District, Chung Mon Commune, 4, Vietnam

**Annotation.** *The issue of the research – investigation of the hydrodynamics of river sediments' artificial structures in the interfluvium of the Lo and the Kau rivers (The Northern Vietnam) as a tool for the formation of hydrodynamic and geochemical anomalies in water bodies. Laboratory studies of the speeds of movement and sedimentation of suspended sediments were carried out according to the planning of the experiment for a series of using natural and artificial crossbars in modeling the processes of transport and sedimentation of sediments. Based on a laboratory model experiment, the parameters of crossbars at different flow rates are considered for conditions of uniform movement of water in the tray and condition of sedimentation. Graphs of the dependences of the velocities of movement and sediment deposition are drawn, and the parameters of vortex flows in the zone before and after the crossbars are considered. Based on the results of laboratory modeling, graphs of the dependence of the characteristics of the transit and deposition of sediment, taking into account the influence of crossbars, are drawn. The obtained results of laboratory modeling provide data for planning further laboratory and field experiments on the transit of sediment with fertile silt, the accumulation of sediment in the riverbed and the influence of natural and artificial crossbars on sediment deposition, as well as for the formation of mobile sediment-retaining dams. The experiment was planned according to the Shenk X method. The results of the experiment were processed in MathCad and Solidworks.*

**Keywords:** *laboratory modeling, natural and artificial crossbars, sediment transit, sediment deposition, vortex flows*

**Format of citation:** *Glazunova I.V., Rednikov S.N., Nguyen Khanh Zuy. Experimental determination of the characteristics of sediment transfer and deposition under uniform movement in the channel bed, taking into account the influence of natural and artificial crossbars // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 4. P. 92-97. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-92-97.*

**Введение.** Изменения в землепользовании, промышленная деятельность, строительство и эксплуатация гидроэлектростанций оказывают влияние как на гидрологический режим рек, так и на режим наносов. В частности, строительство плотин на реке Меконг изменило динамику сезонного стока. Значительно увеличился сток воды в сухой сезон и произошло сокращение стока реки во влажный сезон [1, 2]. Например, в верхнем течении реки Меконг в районе Чианг Саена (Тайланд) наблюдалось увеличение среднего стока в засушливый сезон на 35% в период 2010-2017 гг. по сравнению с периодом 2000-2009 гг, в то время, как в сезон паводков произошло сокращение стока на 31%.

В дополнение к гидрологической динамике введение в эксплуатацию каскада водохранилищ в верхнем бассейне реки Меконг оказало существенное влияние на режим и баланс наносов в реке. При этом явное снижение концентраций наносов на 60-70% наблюдается непосредственно вниз по течению от плотин, что имело последствия для всего речного бассейна. Так, в 2015 г. общий объем отложения наносов в Паксе (Лаос) снизился на 55% по сравнению с предыдущими

периодами. Добыча песка на начальных участках русла как в верхнем, так и в нижнем течении Меконга, также играет роль в снижении транзита наноса. Период для оценки воздействия полного каскада плотин на гидрологию, транзит и отложения наносов является относительно коротким, поэтому полная картина этого явления исследована не до конца [1, 2].

Эксплуатация водохранилищ сопровождается процессами заиления и занесения отложениями наносов. Наносы донные и взвешенные осаждаются в чаше водохранилища и в зоне подпора. На этих участках требуется предусматривать защитные мероприятия, устройства и сооружения для предупреждения заиления водозаборов оросительных систем от механических загрязнений [3]. Как следствие, происходит сокращение регулирующей емкости, а в случае Меконга имеют место еще некоторые последствия. Происходит сокращение поступления плодородного ила в нижнее течение, что снижает плодородие почв на пойме реки [4, 5]. В результате осветления потока происходит деформация русла и появляется эрозия в нижнем течении реки. Особенно сильно эти процессы проявляются в дельте.

Планы по интенсивному строительству гидроузлов в целях орошения и энергетики требуют технических решений для преодоления вышеописанных проблем.

Управление транспортом и осаждением наносов широко используется в решении многочисленных задач гидротехнического строительства и гидравлики, очистки сточных вод, улучшения экологического состояния водных объектов, технологии добычи и обогащения полезных ископаемых. Управление наносами в загрязненных водоемах позволяет восстановить их кислородный баланс и улучшить общее экологическое состояние. Изучение закономерностей влияния гидравлических режимов, создаваемых естественными и искусственными преградами на режим, транспорт и осаждение наносов, является актуальным направлением при решении обозначенных выше проблем. С этой целью и был заложен первый этап лабораторных исследований.

Исследования минерального и химического состава донных отложений имеют важное значение в разработке, усовершенствовании методик гидрогеохимических поисков полезных ископаемых и решении задач нормирования антропогенного воздействия на поверхностные и подземные водные объекты.

**Цель исследований:** оценка минерального и химического состава речных отложений в междуречье рек Ло и Кау (север Вьетнама) как причины и следствия процессов формирования геохимических аномалий в водных объектах.

Получены ориентировочные оценки расстояния переноса твердых частиц (до 34 км в период дождей) и среднего времени приближения к насыщению речных вод относительно кальция (примерно 9,4 ч). Обоснован вывод о ключевой роли геохимических барьеров в формировании геоэкологических условий речного бассейна, в том числе снижении концентраций цинка, свинца и ряда других элементов в речных водах и донных отложениях на участках до 10-11 км [4, 5]. Комплексное воздействие гидробиологических факторов в рассматриваемом районе проявляется в среднем на участках протяженности около 3-5 км, максимально – до 10-11 км. Длина реки Ло составляет 481 км, средний расход воды на рассматриваемом участке – 155 м<sup>3</sup>/с, площадь бассейна – 11254 км<sup>2</sup>.

**Материалы и методы исследований.** Лабораторные исследования были проведены в лаборатории гидравлики института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова на кафедре гидравлики,

гидрологии и управления водными ресурсами. Первая серия экспериментов проведена осенью 2022 г. на стандартном лотке со следующими характеристиками: высота – 44 см, ширина – 24,5 см; в лоток устанавливались ригеля с размерами 25 × 25 мм и 30 × 30 мм, 50 × 50 мм, расстояние между ригелями составляло 26 см. В качестве материала, имитирующего наносы с однородным илом, использовалась кукурузная крупа со средней величиной фракции 0,7-1,2 мм как наиболее подходящая по характеристикам плотности и мехсоставу к наносам в реке Ло во Вьетнаме, где в диапазоне крупности наносов 0,15-1,5 мм режим осаждения частиц является переходным [5, 6]

Формально границы между влекомыми наносами и донными отложениями могут быть определены по формуле:

$$D_{sblim} = \frac{0,012 \cdot v^3}{h}, \quad (1)$$

где  $D_{sblim}$  – предельный диаметр частиц неподвижной фракции, м;  $v$  – средняя скорость течения, м/с;  $h$  – средняя глубина потока, м. Однако очевидно, что при пространственно-временных изменениях водного стока, гидравлических характеристик потока и пространственных изменениях гранулометрического состава подстилающих и водовмещающих пород предельный диаметр донных отложений также меняется. При их изучении следует учитывать особенности геоморфологии, литологии и водного режима исследуемой территории, что отражено в ряде методических и нормативно-методических документов документов [6].

Средний диаметр взвешенных наносов принят в размере 0,8 мм. Коэффициенты шероховатости определялись обратным расчетом по формулам Маннинга и Шези при известных расходах. Транспортирующие способности потока определялись по расстоянию между ригелями (x3 – размеры ригеля; x4 – тип ригеля). Каждый фактор имеет допустимый диапазон значений. Например, расход воды не должен превосходить величины, обеспечивающие диапазон реальных скоростей в реке Ло в пересчете на модель, размеры ригелей выбраны из нагрузки наносов в пересчете с фактической нагрузки в реке Ло. Средняя мутность ориентировочно принята (при условии среднегодового значения) как 170 г/м<sup>3</sup> [1,2]. Расстояние между ригелями было одинаковым по длине лотка. Естественные ригели имитировались как преграды из стволов дерева диаметром 25, 30, 50 мм.

Эксперимент заключался в фиксировании изменения скоростей потока перед ригелями и после них и их влияния на осаждение наносов,

вызванного изменениями значений факторов. При планировании эксперимента внутри диапазона допустимых изменений значения каждого фактора (от  $x_{i\min}$  до  $x_{i\max}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ) выбран ряд промежуточных значений: например, 4 возможных значения расходов [7]. Было запланировано 50 опытов. При этом сочетания значений факторов для каждого опыта задали случайным образом и получили так называемую таблицу планирования эксперимента.

Далее назначили период времени экспериментальной работы по режиму каждой строки таблицы – например, один день. В течение этого периода фиксируются скорости перед ригелями и после них и осаднение наносов. Усредненные за этот период, они заносились в таблицу в виде экспериментального значения величины  $y = Q/F$  или  $Q/M$  (масса наносов):  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, 50$ . Когда таблица была заполнена, все ее содержимое означало так называемые экспериментальные данные. Сама таблица называется таблицей экспериментальных данных и представляет собой таблично заданную функцию – зависимость скорости потока перед ригелями и после них/массы осаднения наносов  $y$  от изменения значений факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$ .

Цель обработки экспериментальных данных заключается в том, чтобы эту табличную, аналитически неизвестную зависимость между переменной  $y$  и переменными  $x_1, x_2, x_3, x_4$  представить в виде математической модели, то есть уравнения, которое «достаточно точно» согласовывало бы расчетные и табличные значения отклика объекта  $y$ : например,  $y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4$ .

Эксперимент заключается в фиксировании объема осевших наносов, параметров оседания и длины пути их трансфера, вызванного изменениями значений факторов. Он был спланирован таким образом, чтобы получить максимальное количество информации при минимальных затратах средств и времени. Плотность наносов составила  $720 \text{ г/л}$  ( $\text{кг/м}^3$ ), объемная масса наносов –  $1, 4 \text{ л/кг(м}^3/\text{т)}$ .

**Результаты и их обсуждение.** В лабораторном опыте для каждого эксперимента

#### Таблица. Планирование эксперимента

Table. Planning an experiment

$N_{\text{шт}}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$y$
1	X18	X22	X33	X47	
2	X11	X29	X34	X44	
...	..	...	...	...	
50	X17	X23	X36	X45	

определялась скорость воды при подходе к преграде как расход, деленный на площадь поперечного сечения.

Были построены графики зависимости скорости от величины полного осаднения для ригелей  $25 \times 25 \text{ мм}$ ,  $30 \times 30 \text{ мм}$  и  $50 \times 50 \text{ мм}$  как искусственных, так и естественных форм (рис. 1).

Также были получены графики зависимости скорости от величины осаднения наносов для каждой зоны ригелей. Получен график зависимости величины осаднения наносов и от распределения скоростей в образующихся вихревых потоках (рис. 2).

Все вычисления произведены в комплексе Math Card 15 и Solidworks [8, 9]. При статистической обработке использовались две выборки полученных результатов по планированию эксперимента: осаднение наносов при устройстве искусственных и естественных ригелей разных размеров.

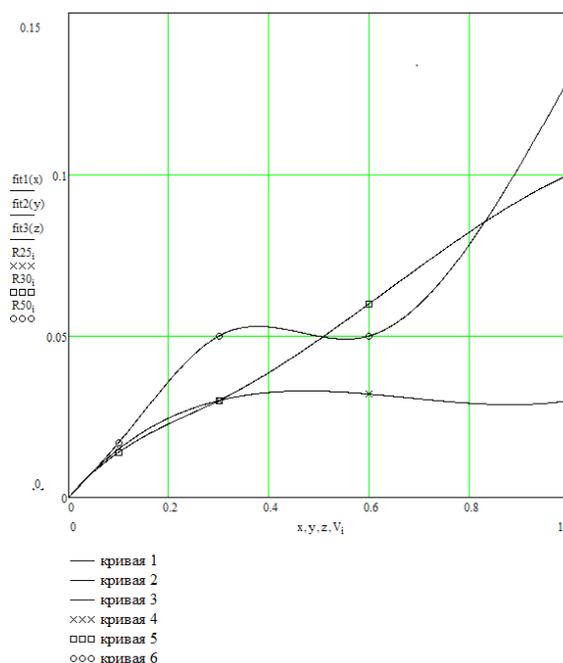


Рис. 1. Результаты эксперимента по осаднению наносов:

кривая 1(4) – естественные ригеля и искусственные ригеля размером  $25 \times 25 \text{ мм}$ ;  
кривая 2(5) – естественные ригеля и искусственные ригеля размером  $30 \times 30 \text{ мм}$ ;  
кривая 3(6) – естественные и искусственные ригеля размером  $50 \times 50 \text{ мм}$

Fig. 1. Results of the sediment deposition experiment:

curve 1(4) – natural crossbars and artificial crossbars  $25 \times 25 \text{ mm}$  in size;  
curve 2(5) natural transoms and artificial crossbars  $30 \times 30 \text{ mm}$  in size;  
curve 3(6) – natural and artificial crossbars ( $50 \times 50 \text{ mm}$ ) in size

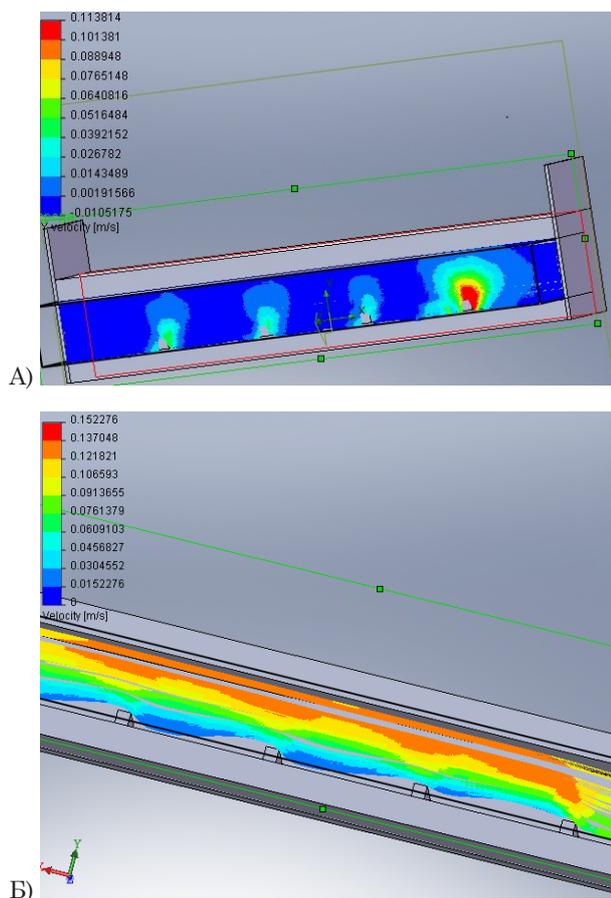


Рис. 2. Результаты статистической обработки скоростей в вихревых потоках вблизи ригелей:

- а) ригель 30 мм с вертикальной составляющей;  
 б) ригель 25 мм без образования вертикальной составляющей при скорости 0,3 м/с

Fig. 2. Results of statistical processing of velocities in vortex flows near crossbars:

- a) 30 mm deadbolt with a vertical component;  
 b) 25 mm deadbolt without vertical component formation at a velocity of 0.3 m/s

### Выводы

В результате выполненных модельных лабораторных гидравлических исследований определены область и направление решения гидравлических задач, связанных с управлением

### Список использованных источников

1. Нгуен К.З., Глазунова И.В. Вопросы при исследовании транзита наносов с плодородным илом для речных бассейнов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы IX Международной научно-практической конференции, Саратов, 27-28 апреля 2022 г. Саратов: ООО «Амирит», 2022. С. 57-61. EDN KBRDYP.
2. Фам Чонг Тиен. Канонические весовые системы в теории пространств бесконечно дифференцируемых и голоморфных функций: Дис. канд. физ. – мат. Наук. Ростов-на-Дону, 2013.
3. Хецуриани Е.Д. Научно-технологическое обустройство водозаборных сооружений оросительных

осаждения насосов, обеспечивающих возможность формирования гибких, подвижных дамб перегородок для накопления наносов в заданных частях русла реки в целях решения названных выше проблем транспорта наносов с плодородным илом во Вьетнаме.

На базе полученных предельных линий токов в канале вблизи ригелей выявлена связь их с зонами осаждения наносов, которая подчиняется расчету для означенных условий эксперимента. Форма и размеры рассмотренных ригелей незначительно влияют на формирование зон осаждения наносов в диапазоне скоростей 0,1...0,3 м/с. Вертикальная составляющая начинается образовываться при скорости 0,3 м/с в зоне влияния ригеля с размером 30 мм.

Статистический анализ показал, что для достижения эффективного осаждения наносов в заданной области при рассмотренных естественных и искусственных ригелях диапазон скоростей (расходов) потока должен находиться в пределах 0,3...1 м/с с образованием вертикальной составляющей. На основании гидромеханико-гидравлического подхода транспорта наносов с использованием теории турбулентных восходящих вихревых потоков вблизи естественных и искусственных ригелей по трансформации осредненных скоростей выявлены области применения этой технологии. Она может использоваться при распространении защиты для формирования русла реки, возможности сохранения режима наносов при изменении гидрологических параметров речного стока и обеспечения сохранности условий хозяйствования и экосистемы в нижнем течении реки Ло.

Для правильной оценки эффективности данного метода необходимо продолжить заложенный лабораторный эксперимент и сравнить эффективность конкурирующих вариантов, особенно при разных форме, конфигурации и расположении ригелей для формирования гибких подвижных плотин и зон осаждения наносов.

### References

1. Nguyen K.Z. Issues in the study of the transit of sediment with fertile silt for river basins / K.Z. Nguyen, I.V. Glazunova // Innovations in environmental management and protection in emergency situations: Materials of the IX International Scientific and Practical. conf. Saratov, April 27-28, 2022. Saratov: Amirit LLC, 2022. P. 57-61. – EDN KBRDYP.
2. Pham Chong Tien. Canonical weight systems in the theory of spaces of infinitely differentiable and holomorphic functions, topic of the dissertation and abstract on the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 01.01.01, candidate of physical and mathematical sciences. Fam....Rostov-on-Don, 2013.

систем на юге России: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2022.

4. **Барсукова М.В., Глазунова И.В., Король Т.С., Лагутина Н.В.** Экологическая безопасность сельского хозяйства и сельскохозяйственной продукции – реальные шаги // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2020. № 8. С. 7-10. DOI: 10.37882/2223-2966.2020.08.02. EDN PPPVNJ.

5. **Кирейчева Л.В., Глазунова И.В.** Природные сорбенты для детоксикации загрязненных почв // Плодородие. 2008. № 6(45). С. 44-46. EDN KUCNMH.

6. **ГОСТ 17.1.5.01-80.** Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/7884>.

7. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972.

8. **Найгерт К.В., Редников С.Н.** Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серии «Машиностроение». 2016. Т. 16, № 2. С. 52-60. DOI: 10.14529/engin160206. EDN WBOWFF.

9. Патент № 2634166 РФ, МПК F15B21/06. Магнито-реологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком (варианты)/ **Найгерт К.В., Редников С.Н.** № 2015139197; заявл. 18.08.2014; опублик. 24.10.2017. EDN KMETUW.

#### Критерии авторства

Глазунова И.В., Редников С.Н., Нгуен Кхань Зуи выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 09.04.2023

Одобрена после рецензирования 28.08.2023

Принята к публикации 28.08.2023

3. **Khetsuriani E.D.** Scientific and technological arrangement of water intake structures of irrigation systems in the south of Russia 01/06/02 – Reclamation, reclamation and land protection. Abstract of the dissertation for the degree of doctor of technical sciences... Saratov, 2022.

4. **Barsukova M.V., Glazunova I.V.** Environmental safety of agriculture and agricultural products – real steps / M.V. Barsukova, I.V. Glazunova, T.S. Korol, N.V. Lagutina // Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences. 2020. No. 8. P. 7-10. – DOI 10.37882/2223-2966.2020.08.02. – EDN PPPVNJ.

5. **Kireicheva L.V., Glazunova I.V.** Natural sorbents for detoxification of contaminated soils // Fertility. 2008. No. 6(45). P. 44-46. – EDN KUCNMH.

6. **GOST 17.1.5.01-80** Nature conservation. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water bodies for pollution analysis <https://internet-law.ru/gosts/gost/7884>

7. **Schenk X** Theory of engineering experiment Author: Publishing house: Mir, 1972.

8. **Naigert K.V., Rednikov S.N.** Technologies for controlling flow characteristics of flow by changing the rheological properties of working media / K.V. Naigert, S.N. Rednikov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering. 2016. T. 16, no. 2. pp. 52-60. – DOI 10.14529/engin160206. – EDN WBOWFF.

9. **Naigert K.V., Rednikov S.N. Patent No. 2634166** RF, IPC F15B21/06. Magnetorheological drive of direct electromagnetic control of the flow characteristics of the upper circuit of a hydraulic system with a hydraulic bridge (options): No. 2015139197: application. 08/18/2014: publ. 10/24/2017 / K.V. Neigert, S.N. Rednikov. – EDN KMETUW.

#### Criteria of authorship

Glazunova I.V., Rednikov S.N., Nguyen Khanh Zuy carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they carried out a generalization and wrote the manuscript. Glazunova I.V., Rednikov S.N., Nguyen Khanh Zuy have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

The article was received by the editor on 09.04.2023

Approved after peer review 28.08.2023

Accepted for publication 28.08.2023