

## К совершенствованию системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы

Т.Н. Синцова<sup>1</sup>  , А.П. Лепихин<sup>1,2</sup> 

 tanya\_sinzova@mail.ru

<sup>1</sup>Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Вся действующая в настоящее время система регламентации основывается на допущениях, что физические или химические показатели качества воды однозначно определяются совокупностью внутриводоемных и внешних антропогенных процессов. Однако динамика параметров, влияющих на состояние водного объекта, описывается, как правило, достаточно сложными случайными процессами. Наиболее ярко стохастическая природа показателей качества воды проявляется в регламентации взвешенных веществ. **Методы.** Для анализа колебаний содержания взвешенных веществ использовались материалы как регулярных наблюдений на сети Росгидромета, так и собственных наблюдений. Применение современных измерительных комплексов открывает принципиально новые возможности в системе сбора и обработки данных. **Результаты.** Исходя из действующей нормативной погрешности измерений концентраций взвешенных веществ, а также их естественной дисперсии в русловых потоках показана технологическая невозможность выполнения действующих нормативных требований к регламентации отведения взвешенных веществ. Предложена альтернативная система регламентации взвешенных веществ на основе использования автоматических измерительных комплексов. Указаны необходимые условия для обеспечения корректности функционирования системы регламентации отведения взвешенных веществ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** взвешенные вещества, регламентация, стохастика, поверхностные водные объекты, качество воды, гетерофазнонеконсервативные вещества.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания: проект «Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования», регистрационный номер НИОКТР № 1022040500593-9-1.5.12.

**Для цитирования:** Синцова Т.Н., Лепихин А.П. К совершенствованию системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 16–31. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-16-31.

Дата поступления 14.11.2023.

**TO IMPROVING THE SYSTEM FOR REGULATING THE DISCHARGE  
OF SUSPENDED SUBSTANCES INTO SURFACE WATER BODIES,  
TAKING INTO ACCOUNT THEIR STOCHASTIC NATURE**

Tatyana N. Sintsova<sup>1</sup>  , Anatoly P. Lepikhin<sup>1,2</sup> 

 tanya\_sinzova@mail.ru

<sup>1</sup>Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

<sup>2</sup>RosNIIVKh Kama Branch, Perm, Russia

**ABSTRACT**

**Relevance.** The entire current regulation system is based on the assumptions that physical or chemical indicators of water quality are unambiguously determined by a combination of internal and external anthropogenic processes. However, rather complex random processes usually describe the dynamics of the parameters that determine the state of a water body. The stochastic nature of water quality indicators is most clearly manifested in the regulation of suspended sediments. **Methods.** To analyze the suspended matter content variations we used outputs of both regular Rosgidromet network observation and our own observations. Application of the advanced gauging complexes create principally new opportunities in the system of data collection and processing. **Results.** Based on the current regulatory error in measuring the concentrations of suspended solids, as well as their observed natural dispersion in channel flows, we have shown that it is technologically impossible to fulfill the current regulatory requirements for regulating the removal of suspended sediments. We have proposed an alternative system for the regulation of suspended solids based on the use of automatic measuring systems, based on the assessment of water turbidity through a change in its optical density. We present the necessary preconditions for providing the correct functioning of the system for suspended matter disposal regulation.

**Keywords:** suspended solids, regulation, stochastics, geochemical, metrological, technological approaches, threshold indicators, heterophase non-conservative substances.

**Financing:** The work has been done with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the governmental assignment: "Investigation of regularities of the hydro/sphere evolution in the areas of intensive use of mineral resources in order to mitigate environmental risks and to provide sustainability of water use", registration number No. NIOKTR1022040500593-9-1.5.12.

**For citation:** Sintsova T.N., Lepikhin A.P. To improving the system for regulating the discharge of suspended substances into surface water bodies, taking into account their stochastic nature. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 16–31. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-16-31.

Received 14.11.2023.

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблематика отведения содержания взвешенных веществ в водные объекты довольно широка и включает, как минимум, семь актуальных аспектов регламентации:

- гидробиологические [1–3];
- санитарно-гигиенические<sup>1,2</sup>;
- гидродинамические [4–9];
- географические [6–8, 10, 11];

<sup>1</sup> СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод.

<sup>2</sup> СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.

- технологические<sup>3,4</sup>;
- мониторинговые [8, 12];
- гидрохимические [6–8, 13].

Каждому из этих аспектов посвящено большое количество исследований. Однако, несмотря на широкий охват проблематики, они не включают такой актуальный аспект, как статистические характеристики колебаний концентраций взвешенных веществ в водных объектах. Детальное исследование этого важного аспекта стало возможным только при переходе на автоматические системы контроля. Отметим, что именно данная проблематика может играть ключевую роль в построении современных систем регламентации взвешенных веществ в водных объектах.

Оценка актуального состояния и возможных экстремальных характеристик любого физического или химического показателя качества воды водных объектов может рассматриваться только с определенной погрешностью, соответственно, для того чтобы нормативы качества были эффективны, необходимо, чтобы они учитывали данную погрешность с требуемой надежностью. Содержание взвешенных веществ в наибольшей мере определяется гидрологическим режимом рассматриваемого водотока, являющимся сложным случайным процессом, поэтому его регламентация – наиболее яркий пример вероятности невыполнения установленных требований.

Значительное разнообразие факторов, определяющих в водотоке содержание взвешенных веществ, их существенная внутригодовая изменчивость обусловили для данного загрязнителя принципиально отличную схему регламентации. Его регламентация строится не на некоторых пороговых значениях, единых для всех водных объектов, а на основе нормирования локальных изменений качества воды между фоновым и контрольным створами. Согласно Методике<sup>5</sup> содержание взвешенных веществ в контрольном створе водного объекта не должно превышать более чем на 0,25 мг/л по сравнению с фоновым створом показатели в водных объектах первой категории и на 0,75 мг/л – в водных объектах второй категории. Однако, согласно нормативным документам<sup>6,7</sup>, средняя квадратическая погрешность определения взвешенных веществ составляет 10 %. Возникает вопрос, как должна быть построена система производственного мониторинга, которая позволяла бы с требуемой надежностью гарантировать выполнение требований. Парадокс ситуации заключается в том, что, с одной стороны, С.Н. Черкинский еще в 1947 г. указывал [14] на низкую обоснованность данных нормативов, отме-

<sup>3</sup> Р 52.24.353-2012. Отбор поверхностных вод суши и очищенных сточных вод.

<sup>4</sup> ПНД Ф 12.15.1-08. Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод.

<sup>5</sup> Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 г.). Утв. Приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 г. № 1118.

<sup>6</sup> РД 52.08.104-2002. Методические указания. Мутность воды. Методика выполнения измерений. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. СПб. Гидрометеоздат, 2002.

<sup>7</sup> РД 52.24.468-2019. Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом. Росгидромет. ФГБУ ГХИ. 2019.

чая, что они основывались на материалах Английской Королевской комиссии по пресноводному рыбоводству 1907 г., а, с другой стороны, взвешенные вещества являются наиболее распространенным и наиболее часто регламентируемым компонентом загрязнения отводимых сточных вод, т. к. они, кроме непосредственного воздействия на гидробионтов, могут выступать как активный транспортер гетерофазнонеконсервативных поллютантов. Однако ролью взвешенных веществ в переносе данных поллютантов можно пренебречь, если будет выполнено одно из следующих неравенств [6]:

$$\left( a_i \frac{S}{\rho_s} \right) \leq C_{\phi i}, \quad (1)$$

$$\left( a_i \frac{S}{\rho_s} \right) \leq C_{ПАКi},$$

где  $a_i$  – концентрация подвижных форм  $i$  – поллютанта на взвешенных частицах;  
 $S$  – концентрация рассматриваемых взвешенных наносов;  
 $\rho_s$  – плотность материала взвешенных наносов;  
 $C_{\phi i}$  – естественное фоновое содержание  $i$  – ингредиента в воде водного объекта.

### Постановка задачи

Стохастичность как физических, так и химических показателей качества воды поверхностных водных объектов обуславливается совокупностью как метрологической погрешности их определения, так и случайным характером параметров их определяющих. Статистические особенности распределений концентраций поллютантов в отводимых сточных водах рассмотрены в [7]. Наиболее очевидны неопределенности, связанные с метрологической погрешностью определения показателей качества воды. Данные неопределенности невелики, относительная среднеквадратическая погрешность определения показателей качества воды, как правило, составляет  $\sim 10\%$ <sup>6</sup>. При этом считается, что при формировании погрешностей измерений выполняются условия центральной предельной теоремы и их колебания описываются нормальным распределением, хотя в ряде случаев колебания погрешностей измерений могут описываться другими, существенно отличными от нормального распределениями [15]. Значительно более сложный характер носит оценка контролируемых показателей, связанная с их пространственно-временной изменчивостью, а также факторами формирования гидрологического и гидрохимического режимов водных объектов.

Учитывая тот факт, что практически все охраняемые водные объекты характеризуются турбулентным режимом, их оценка должна учитывать внешние, внутренние, пространственные и временные масштабы состояния водного объекта. При этом, если внутренние масштабы турбулентности определяются по гипотезе А.Н. Колмогорова [16] кинематической вязкостью воды ( $\nu$  [м<sup>2</sup>/с]) и скоростью диссипации турбулентной энергии ( $\epsilon$  [м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>]), то внешние пространственные масштабы устанавливаются морфометрией водного объекта. Временные масштабы при диффузионном механизме переноса содержания контролируе-

мых показателей связаны с пространственными следующим образом  $T = H^2/K_{zz}$ , где  $T$  – характерный временной масштаб;  $H$  – характерный размер поперечного сечения;  $K_{zz}$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии.

При корректном решении задач регламентации взвешенных веществ принципиальное значение, кроме принятия и установления допустимых пороговых уровней по концентрациям, имеет также необходимость принятия пространственно-временных масштабов действия данных нормативов [6]. Чувствительность гидробионтов к воздействию токсикантов, как показывают многочисленные исследования [1–3, 13, 17], в значительной мере определяется и временем воздействия. В то же время любая система как технического, так и питьевого водоснабжения обладает определенной инерционностью, поэтому в общем случае должно проводиться сопоставление пространственно-временных масштабов системы водопользования и соответствующих масштабов формирования качества воды.

Конечной целью организации и проведения водоохраных мероприятий является сохранение поверхностных водных объектов в близком к их естественному состоянию. Установление регламентируемых параметров удобнее всего проводить, исходя из оценки однородности качества воды в фоновом и контрольном створах. Данное требование, в первую очередь, относится к задаче регламентации взвешенных веществ, т. к. содержание взвешенных веществ в водных объектах, кроме внешнего воздействия, определяется также внутриводоемными факторами – гидродинамическим режимом водного потока. Поэтому система его регламентации строится на оценке значимости локальных превышений содержания взвешенных веществ в контрольном створе над фоновым. Полное описание стационарного случайного процесса задается установлением его функции распределения и автокорреляции, эти характеристики должны учитываться при построении системы регламентации. Если  $f_{\phi}(S)$ ,  $f_{\kappa}(S)$  – соответственно, функции плотности распределения взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах,  $P$  – вероятность, тогда в общем случае необходимо, чтобы

$$|f_{\kappa}(S) - f_{\phi}(S)| \leq P. \quad (2)$$

В настоящее время известно большое количество критериев оценки близости статистических распределений [18]. При этом оценка однородности концентраций взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах с методической позиции на основе сопоставимости их функций распределения представляется наиболее обоснованной. Однако такой подход существенно усложняет процедуры расчетов, поэтому традиционно используются некоторые точечные оценки. Формально в действующих методических указаниях<sup>5</sup> не указывается, какие параметры должны использоваться при оценке различия концентраций взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах рассматриваемого водотока. Как правило, применяются разовые значения или некоторые локальные средние значения. При значительной дисперсии оценки взвешенных веществ использование единичных замеров совершенно некорректно. Если оценка строится на сопоставимости локальных средних

значений, то наиболее удобно использовать критерий Стьюдента: данный критерий, во-первых, является параметрическим, во-вторых, его оценки робастны, т. е. достаточно устойчивы к отклонениям от нормального распределения. Сама схема данного критерия записывается следующим образом:

$$\frac{(\bar{C}_K - \bar{C}_\phi)}{\left[ \frac{\sigma_K^2}{N_k} + \frac{\sigma_\phi^2}{N_\phi} \right]^{1/2}} < t_{1-p}(N), \quad (3)$$

где  $t_{1-p}(N)$  – квантиль распределения Стьюдента  $1-p$  порядка на основе  $N$  замеров в контрольном и фоновом створах,  $N = N_k + N_\phi - 2$ ;

$\bar{C}_K$  – средняя концентрация взвешенных веществ в контрольном створе на основе  $N_k$  замеров;

$\bar{C}_\phi$  – средняя концентрация взвешенных веществ в фоновом створе на основе  $N_\phi$  замеров;

$\sigma_K^2$  – дисперсия содержания взвешенных веществ в контрольном створе;

$\sigma_\phi^2$  – дисперсия содержания взвешенных веществ в фоновом створе.

При этом необходимо учитывать, что дисперсия содержания взвешенных веществ как в контрольном створе, так и в фоновом створе

$$\sigma_K^2 = \sigma_{EK}^2 + \sigma_{metk}^2, \quad (4)$$

$$\sigma_\phi^2 = \sigma_{E\phi}^2 + \sigma_{met\phi}^2, \quad (5)$$

где  $\sigma_E^2$  – дисперсия изменения естественного содержания взвешенных веществ в рассматриваемом водотоке;

$\sigma_{met}$  – метрологическая погрешность измерения взвешенных веществ, соответственно, в контрольных и фоновых створах водотоков.

Используя соотношение (3), несложно оценить требуемое количество параллельных замеров взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах для того, чтобы обеспечить выполняемость данного норматива с надежностью  $1-p$ . При этом необходимо подчеркнуть, что измерения должны быть статистически однородными при заданных условиях.

Формально в действующей в настоящее время системе регламентации<sup>8,9</sup> не вводится и не рассматривается надежность соблюдения нормативных требований, априорно предполагается, как уже отмечалось, абсолютная надежность систем контроля. Однако, так как в качестве минимального нормативного расхода используется минимальный месячный расход года 95 % обеспеченности, можно предположить, что соблюдение нормативов должно обеспечиваться с надежностью 95 %. Критическое значение  $t_{1-p}(N)$  монотонно убывает с увеличением  $N$  и стремится к  $t_{1-p}(N) \rightarrow \text{const}$  при  $N \geq 120$ , при этом  $t_{95\%} \rightarrow 1,64$ .

Рассмотрим простейший пример. Пусть выполняется вполне естественное допущение, что  $N_k \sim N_\phi$ , функция распределения подчиняется нормальному

<sup>8</sup> Методические указания по разработке нормативов допустимых воздействий. Утв. Приказом Минприроды России № 328 от 12.12.2007 г.

<sup>9</sup> РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков.



закону, также дисперсии взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах равны, в этом случае для оценки требуемого объема выборки, необходимой для соблюдения условий с надежностью  $1-p$ , имеем

$$N \geq \left( \frac{\sigma \cdot \sqrt{2} \cdot t(N)}{\Delta C} \right)^2, \quad (6)$$

где  $\Delta C$  – разность выборочных средних значений концентраций взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах.

Из соотношения (6) следует, что при указанных выше параметрах  $\Delta \bar{C} = 0,25$  мг/л,  $\sigma = 10$  мг/л для обеспечения с надежностью 95 % выполнения данного норматива необходимо проведение  $N > 9 \cdot 10^3$ . Получается, что даже при ежедневных отборах проб воды в контрольном и фоновом створах для обеспечения соблюдения данных нормативных условий с требуемой надежностью 95 % нужны практически десятилетние наблюдения. Поэтому следует переходить на автоматические измерительные комплексы, где в качестве измеряемого показателя рассматриваются не непосредственно взвешенные вещества, а мутность воды, измеряемая через изменение оптической плотности (прозрачности воды). Современные технические средства контроля мутности хорошо отработаны, установлены надежные связи между мутностью воды и концентрацией взвешенных веществ.

Учитывая, что колебания содержания взвешенных веществ в русловых потоках характеризуются значительной дисперсией  $\sigma^2$ , принципиально важно определить, что должна обеспечивать регламентация взвешенных веществ – недопустимых статистически значимых в содержании взвешенных веществ с вероятностью  $P_1$  или однородность содержания взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах с надежностью  $P_2$ .

Формально, если исходить из требования (6), мы должны также принимать  $P_1 = 95\%$ , т. е. гарантировать, что вероятность различия в содержании взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах должна быть менее 5%. Однако, учитывая значимую дисперсию содержания  $C$ , это требование практически невыполнимо и экологически необоснованно. В то же время, если достаточно только наличия значимых статистических различий в содержании взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах, то следует принимать  $P = 0,05$ .

Регламентация содержания взвешенных веществ в поверхностных водных объектах строится на оценке допустимости различия содержания данного поллютанта в фоновом и контрольном створах. Однако, чтобы корректно судить о значимости этих различий, они должны быть больше как их погрешности измерений, так и естественной флуктуации мутности в водотоке под воздействием турбулентных пульсаций. При этом система контроля должна позволять использовать как единичные, разовые замеры, так и их серии с осредненными значениями за некоторый промежуток времени.

Исходя из данной схемы, различия в содержании взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах статистически значимы с надежностью  $1-p$ , если будет выполняться неравенство

$$|\Delta C| \geq \sqrt{2} \left[ \frac{\sigma_E^2}{N} + \frac{\sigma_{met}^2}{N} \right]^{1/2} \cdot t_{1-p}(N), \quad (7)$$

а при

$$|\Delta C| < \sqrt{2} \left[ \frac{\sigma_E^2}{N} + \frac{\sigma_{met}^2}{N} \right]^{1/2} \cdot t_{1-p}(N) \quad (8)$$

нет оснований считать рассматриваемые различия статистически значимыми.

Необходимо, чтобы нормативные различия содержания взвешенных веществ между фоновым и контрольным створами были значимо больше  $\Delta C_p$ . Для того чтобы уменьшить величину  $\Delta C_p^N$  (квантиль порядка  $p$  расчетного различия мутности воды в рассматриваемых створах при  $N$  параллельных измерениях), следует увеличить количество измерений или уменьшить погрешность измерений  $\sigma_{met}^2$ , т. к. величина турбулентной пульсации мутности воды не подлежит регулированию. При этом необходимо учитывать, что чем больший период измерений будет рассматриваться, тем больше будет дисперсия  $\sigma_E^2$ , обусловленная изменчивостью гидрологического режима водного объекта.

Задача регламентации принципиально упрощается, если рассматривать однородные по гидрологическому режиму временные интервалы, для которых величина дисперсии взвешенных веществ может приниматься как постоянная. В то же время пороговое значение допустимого превышения взвешенных веществ в контрольном створе по сравнению с фоновым должно определяться при единичных замерах соотношением в простейшем случае. Принимая, что колебания мутности воды подчиняются нормальному закону распределения, имеем:

$$\Delta C < (\sigma_E^2 + \sigma_{met}^2)^{1/2} \cdot P_{1-p}, \quad (9)$$

где  $P_{1-p}$  – квантиль нормального распределения  $N(0,1)$ .

При этом  $t_{1-p}(N) \rightarrow P_{1-p}$  при объеме рассматриваемой выборки  $N \rightarrow \infty$ . Современные измерительные комплексы обеспечивают весьма малую погрешность измерения, т. к. при этом, как правило,  $\sigma_E^2 \gg \sigma_{met}^2$ , то соотношение (9) упрощается.

В целом, в допущении что колебания концентраций взвешенных веществ описываются нормальным распределением, при регламентации их отведения необходимо выполнение условия, при котором допустимое содержание взвешенных веществ в контрольном створе определяется следующим соотношением:

$$C_{взк} \leq C_{взф} \cdot (1 + K_p \cdot Cv), \quad (10)$$

где  $C_{взк}$  – допустимая концентрация взвешенных веществ в контрольном створе;  
 $C_{взф}$  – текущее естественное содержание взвешенных веществ в фоновом створе;

$K_p$  – квантиль порядка- $p$ , устанавливаемая исходя из требования недопустимости с надежностью  $1-p$  превышения содержания взвешенных веществ в контрольном створе их естественных колебаний или нахождения с вероятностью  $p$  внутри диапазона их естественных колебаний.



Величина  $C_v$  определяется характером системы контроля качества отводимых сточных вод: чем меньше частота замеров и чем больше продолжительность времени между отдельными замерами, тем больше  $C_v$ . Если при этом различия в фоновом и контрольном створах с надежностью 95 %, то принимая в первом приближении  $C_{взк} - C_{взф} \leq C_v \cdot C_{взф} \cdot K_p$ ,  $K_p = 1,64$ , имеем  $\Delta C_p < \sigma_{met} \cdot 1,64$ . Данное соотношение может быть использовано как основное регламентирующее требование для взвешенных веществ при временных контролях  $\Delta T < \left| \left( \frac{1}{Q} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right)^{-1} \right|$ , где  $Q$  – расход водотока.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существенный как практический, так и теоретический интерес представляют результаты статистической обработки колебаний мутности воды при различной частоте измерений в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники (рис. 1). Данный участок представляет собой зону выклинивания Камского водохранилища. В теплый период при поддержании уровня воды, близкого к нормальному подпорному уровню, он характеризуется замедленным гидрологическим режимом, в зимний период при сработке водохранилища наблюдаются типичные речные условия. Данный водный объект испытывает значительные нагрузки от активно разрабатываемого крупнейшего Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВКМКС), также он используется в водообеспечении промышленных предприятий этого комплекса.

Для анализа колебаний содержания взвешенных веществ использовали материалы регулярных наблюдений Росгидромета и собственных наблюдений с применением измерительного комплекса Valeport MIDAS ECM (рис. 1). Данный прибор<sup>10</sup> позволяет определять направление и скорость потока, мутность, электропроводность, скорость звука в воде, температуру и давление. Измерительный комплекс может работать в нескольких режимах:

- в режиме профилирования, т. е. непрерывной регистрации изменений определяемых параметров с погружением или подъемом датчика;
- в режиме регистрации определяемых параметров на глубине погружения в течение длительного промежутка времени с заданной частотой.

Архитектура прибора позволяет производить измерения как в режиме реального времени с отображением и записью результатов на персональном компьютере, так и с записью во внутреннюю память прибора с последующей конвертацией этих данных.

Измеритель мутности регистрирует свет, рассеянный взвешенными в воде частицами, генерируя выходное напряжение, пропорциональное мутности или взвешенным твердым веществам. Используемая в данной работе модель – Midas ECM – имеет оптическую конструкцию, которая ограничивает измерительный объем в пределах 5 см от датчика, что позволяет проводить измерения вблизи дна, сводя к минимуму ошибочные отражения в ограниченных пространствах.

<sup>10</sup> Интернет-адрес Valeport MIDAS ECM <https://www.valeport-co-uk>.



**Рис. 1.** Картограмма исследуемого участка р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники.  
**Fig. 1.** Map – diagram of the studied section of the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки внутригодовой динамики содержания взвешенных веществ использовали материалы регулярных наблюдений Пермского ЦГМС – филиала ФГБУ «Уральское УГМС» на створе в 150 м выше автодорожного моста через р. Каму, т. е. рассматриваемые взвешенные вещества в значительной мере сформировались под воздействием естественных факторов. Результаты статистической обработки данных представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Статистические характеристики концентраций взвешенных веществ (мг/л) в р. Каме (Камское водохранилище) выше г. Березники при частоте измерений  $\nu = 1/\text{мес}$  за период наблюдений Росгидромета 1974–2001 гг.  
**Table 1.** Statistical characteristics of suspended solids concentrations (mg/l) in the Kama River (Kama Reservoir) upstream the city of Berezniki at a measurement frequency of  $\nu = 1/\text{month}$  for the Rosgidromet observation period of 1974 – 2001.

Месяц	Объем выборки, N	Глубина, м	Среднее значение, $x_{\text{ср}}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, $C_v$	Коэффициент асимметрии, $C_s$	Экссесс, $E_x$
Июль	9	9	15,578	11,743	0,754	1,382	0,059
Сентябрь	8	9	7,706	4,109	0,533	-0,446	-0,703
Октябрь	7	9	9,450	6,587	0,697	0,946	0,080
Февраль	6	0,5	6,867	4,720	0,687	0,349	0,193
Март	7	0,5	5,257	4,184	0,796	0,825	0,058

Как следует из данных табл. 1, концентрации взвешенных веществ характеризуются значительной изменчивостью, сопоставимой с их средними измеренными значениями, при этом коэффициент вариации  $C_v \sim 0,5 - 0,8$ . Следует подчеркнуть, что значимая изменчивость взвешенных веществ, хотя и существенно меньшая, чем представленная в табл. 1, фиксируется при значительно более краткосрочных наблюдениях при однородном гидрологическом режиме.

В табл. 2 представлены материалы измерений, выполненные с разной частотой за 22.07.2021 г., 14.10.2022 г. ( $\nu = 1/с$  и 13.09-14.09.2021  $\nu = 12/ч$ ). При такой высокой частоте измерений колебания мутности воды обусловлены турбулентными пульсациями.

**Таблица 2.** Статистические характеристики мутности воды (FTU) в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники для различных частот измерений  
Table 2. Statistical characteristics of water turbidity (FTU) in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for different measurement frequencies

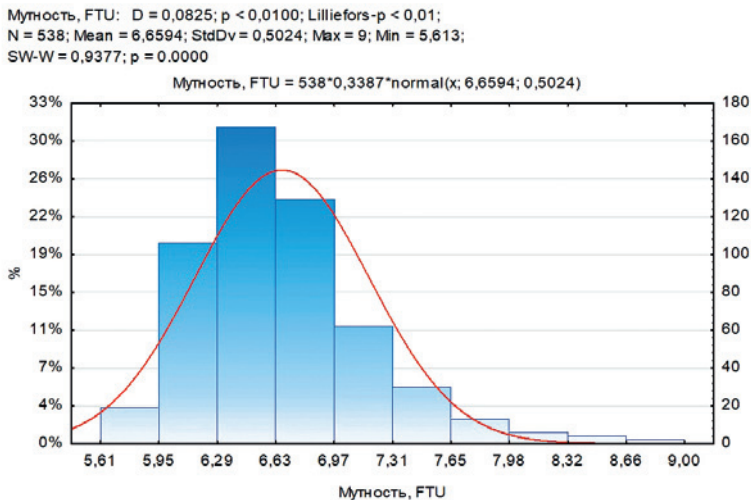
Дата	Объем выборки, N	Глубина, м	Частота измерений	Среднее значение, $x_{cp}$	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, $C_v$	Коэффициент асимметрии, $C_s$	Экссесс, $E_x$
22.07.2021 <sup>1</sup>	143	8	1/с	6,907	0,464	0,067	0,924	1,04
14.10.2022	538	7	1/с	6,659	0,502	0,075	1,132	2,07
13.09 – 14.09.2021	175	10	12/ч	6,394	0,362	0,057	0,824	1,109

*Примечание:* <sup>1</sup>измерения 22.07.2021 г. были выполнены при наличии существенной вертикальной плотностной стратификации водных масс.

Как следует из табл. 2, колебания мутности воды характеризуются весьма существенными значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса. Эти особенности колебаний мутности воды подтверждаются материалами измерений, выполненными в другие сроки (22.07.2021 г. и 14.10.2022 г.) с использованием того же измерительного комплекса. Следует отметить, что существенная асимметрия колебаний мутности воды сохраняется и при измерениях со значительно меньшей частотой ( $\nu = 12/ч$ ) и продолжительностью измерений  $T_{из} \sim 1$  сут, выполненными 13–14.09.2021 г. с установкой прибора на глубине 10 м. При такой частоте измерений они вряд ли определяются только турбулентными пульсациями, вероятно, важную роль в их формировании играют значительно более инерционные, когерентные структуры.

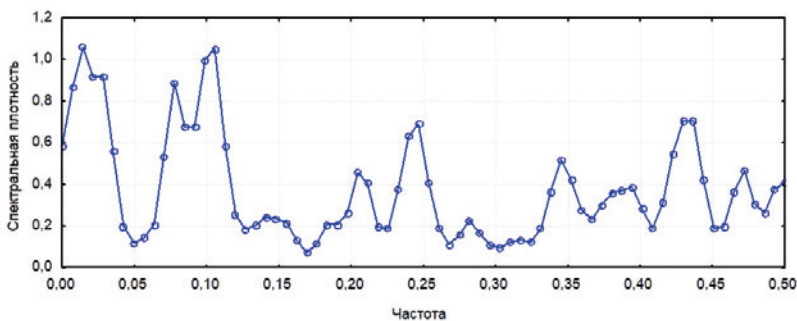
Характерной особенностью пульсаций мутности воды является их значимая положительная асимметрия, соответственно, распределение показателей мутности в ее периферийных частях не описывается нормальным распределением (рис. 2). Данная особенность, по-видимому, обуславливается значительной отрицательной плавучестью взвешенных частиц. На наличие значительных тяжелых «хвостов» распределения взвешенных веществ указано в работе [7]. Значимое отличие распределения колебаний мутности воды, а, соответственно, и взвешенных веществ от нормального распределения, накладывает дополнительные трудности на порядок регламентации отведения взвешенных веществ.

При достаточной близости первых четырех статистических моментов показателей мутности воды при отсечке замеров с частотой 1/с и 12/ч следует обратить внимание на принципиальное отличие их спектральных плотностей (рис. 3–5), что вполне объяснимо принципиальным различием механизмов, обуславливающих их колебания.



**Рис. 2.** График плотности вероятности распределения колебаний мутности воды в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники при проведении эксперимента 14.10.2022 г. на глубине 7 м с частотой измерений  $\nu = 1/с$ .

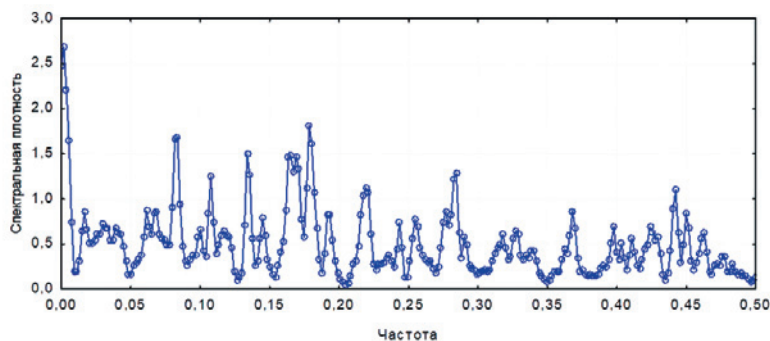
Fig. 2. Probability density graph of the distribution of fluctuations in water turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki during an experiment on October 14, 2022 at a depth of 7 m with the measurement frequency  $\nu = 1/s$ .



**Рис. 3.** График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 22.07.2021 г. 13:54:36 – 22.07.2021 13:56:58 с 1-секундным интервалом.

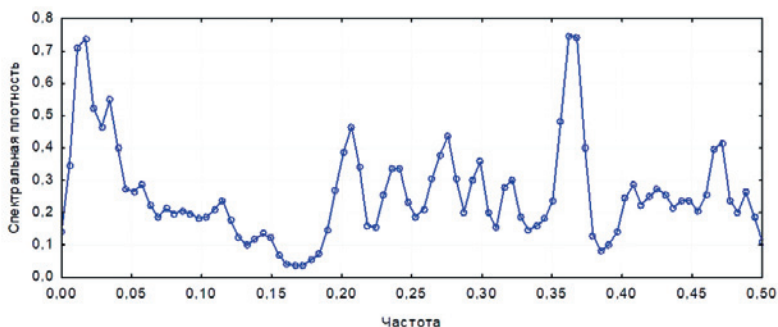
Fig. 3. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 07/22/2021 13:54:36 – 07/22/2021 13:56:58 with a 1-second interval.

Если короткопериодные колебания мутности обуславливаются турбулентными пульсациями с ярко выраженными характерными временными масштабами  $T \sim 7$  с и 40–50 с, то в суточных колебаниях отчетливо проявляются колебания с периодом  $\sim 0,25$  и 5 ч. Период пять часов согласуется с характер-



**Рис. 4.** График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 14.10.2022 г. 14:48:30 – 14:57:27 с 1-секундным интервалом.

Fig. 4. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 10/14/2022 14:48:30 – 14:57:27 with a 1-second interval.



**Рис. 5.** График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 13.09.2021 г. 14:17:29 – 14.09.2021 4:47:28 с 5-минутным интервалом.

Fig. 5. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 09/13/2021 14:17:29 – 09/14/2021 4:47:28 with a 5-minute interval.

ным временем вертикального перемешивания водных масс вследствие вертикальной турбулентной диффузии. Очевидно, что  $T \sim H^2/K_{zz}$ , учитывая, что по многочисленным оценкам  $K_{zz} = 0,07 \cdot V_* H$ , где  $H$  – глубина потока, м;  $V_*$  – динамическая скорость,  $V_* = g^{1/2} V_{cp} / C$ ,  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_{cp}$  – средняя скорость на глубине 10 м,  $C$  – коэффициент Шези. При  $H \sim 10$  м,  $V_{cp} = 0,532$  м/с,  $C \sim 50$  м<sup>1/2</sup>/с имеем  $T \sim 5$  часов. Анализ колебаний мутности воды с 20-минутной частотой наблюдения представлен в работе [8].

## ВЫВОДЫ

Применение современных измерительных комплексов открывает принципиально новые возможности в решении вопроса регламентации отведения взвешенных веществ, являющихся наиболее распространенным компонентом загрязнения сточных вод. Сложность этой задачи определяется многофакторностью формирования динамики потоков взвешенных веществ, их стохастическим характером. Поэтому традиционная схема регламентации, построенная на установлении порога не превышения содержания взвешенных веществ



в контрольном створе над фоновым, представляется некорректной при частоте контроля даже 1/сут, т. к. в водных объектах наблюдается значительная дисперсия взвешенных веществ, существенно возрастающая со снижением частоты опробования. Как следует из сопоставления табл. 1 и табл. 2, дисперсия содержания взвешенных веществ, вызываемая неоднородностью гидрологического режима водотока, на порядок больше дисперсий, обусловленных суточной изменчивостью внутриводоемных процессов. При этом принципиально важно подчеркнуть, что если обусловленная неоднородностью гидрологического режима дисперсия может быть принципиально уменьшена путем увеличения частоты опробования, переходом на гидрологически однородные отрезки, то дисперсия взвешенных веществ, вызванная турбулентными процессами, не может быть снижена и ее необходимо в обязательном порядке учитывать при регламентации отведения сточных вод.

Введенная более 80 лет назад традиционная схема регламентации отведения взвешенных веществ не учитывает сложный стохастический характер их динамики. Некорректность постановки задачи обусловила значительную внутреннюю противоречивость действующих в настоящее время методик и нормативов.

Для обеспечения корректности функционирования данной альтернативной, принципиально отличной от традиционной, схемы регламентации необходимо выполнение следующих условий:

- транспортирующая способность потока, определяющаяся его гидравлическим режимом, должна быть равномерна на участке от фонового до контрольного створа, а различие во времени отбора проб в этих створах существенно меньше времени добегающего между ними. При этом для обеспечения однородности рядов по определению содержания взвешенных веществ в водном объекте должна обеспечиваться однородность их гидрологического режима;
- взвешенные вещества должны представлять собой химический нейтральный поллютант, не участвующий в транспортировке гетерофазноконсервативных веществ;
- размеры частиц взвешенных веществ должны быть однородны на всем рассматриваемом участке;
- влияние на содержание взвешенных веществ в фоновом створе вышерасположенного участка водного объекта должно быть минимально;
- нормативные различия содержания взвешенных веществ между фоновым и контрольным створами должны быть больше расчетных различий  $\Delta C_p$  с надежностью 95 % при выполнении требования  $\Delta C_p < \sigma_{met} \cdot 1,64$ .

Для совершенствования системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы необходим переход на автоматические измерительные комплексы, обеспечивающие наименьшую погрешность измерения, а также на альтернативные системы регламентации взвешенных веществ ввиду технологической невозможности выполнения действующих нормативных требований к регламентации их отведения.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепихин А.П., Головачева С.И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 4–13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1.
2. Зиновьев Е.А., Китаев А.Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5. С. 283–288.
3. Чалов С.Р., Есин Е.В., Леман В.Н. Влияние взвешенных наносов на речные ихтиоцены // Известия ТИНРО. 2019. Т. 199. С. 179–192.
4. Гончаров В.Н. Движение наносов. М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1938. 312 с.
5. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
6. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002. 235 с.
7. Лепихин А.П., Синцова Т.Н. К статистике показателей качества отводимых сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 23–46. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_2.
8. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2020. № 3. С. 34–46.
9. Du Buat P.-L.-G. Principes d'hydraulique et de pyrodynamique. Paris, 1816; Hickin, E.J. River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport, 1995. 106 p.
10. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. Серия Синергетика: от прошлого к будущему. Книжный дом «Либроком», 2009. 440 с.
11. Dolgonosov B.M., Korchagin Catchment-scale model for predicting statistical distributions of hydrochemical and microbial indicators in river // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 504. P. 104–114.
12. Богомоллов, А.В., Лепихин А.П., Ляхин, Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. 2021. № 4. С. 3–11. DOI:10.7242/echo.2021.4.1.
13. Лепихин А.П. К истории развития систем регламентации техногенных воздействий на водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 59–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-4.
14. Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1947. 92 с.
15. Новоцкий Н.В., Зограф Н.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 2- изд., Л.О., 1991. 304 с.
16. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Изд-во Наука, 1965. 639 с.
17. Чалов С.Р., Ефимов В.А. Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. № 4. С. 91–103.
18. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

## REFERENCES

1. Lepikhin A.P., Golovacheva S.I. On the problem of regulating the discharge of suspended substances into natural watercourses. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No. 1. P. 4-13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1 (In Russ.).
2. Zinoviev E.A., Kitaev A.B. On the impact of suspended particles on hydro/fauna. *Newsletter of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015. T.17. No. 5. Pp. 283-288 (In Russ.).
3. Chalov S.R., Yesin E.V., Leman V.N. The influence of suspended sediments on river ichthyocenes. *Izvestia TINRO*. 2019. T. 199. Pp. 179–192 (In Russ.).
4. Goncharov V.N. Sediment movement. M.-L.: Glavnaya redaktsiya stroitelnoy literatury [Main Publishing Board for Literature on Construction], 1938. 308 p. (In Russ.).
5. Grishanin K.V. Fundamentals of channel flow dynamics. M.: Transport, 1990, 320 p. (In Russ.).
6. Venitsianov E.V., Lepikhin A.P. Physical/chemical basis for modeling the migration and transformation of heavy metals in natural waters. Ekaterinburg: Publishing house RosNIIVH, 2002. 235 p. (In Russ.).
7. Lepikhin A.P., Sintsova T.N. On the statistics of quality indicators of discharged wastewater. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 2. P. 23-46. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_2\_2 (In Russ.).

8. Chalov S.R., Tsypfenkov A.S. The role of large-scale turbulence in changes in river water turbidity. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2020. No. 3. Pp. 34–46 (In Russ.).
9. Du Buat P.-L.-G. Principes d'hydraulique et de pyrodynamique. Paris, 1816; Hickin, E.J. River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport, 1995. 106 p.
10. Dolgonosov B.M. Nonlinear dynamics of ecological and hydrological processes. Synergetic series: from past to future. Book house «Librocom», 2009. 440 p. (In Russ.).
11. Dolgonosov B.M., Korchagin Catchment-scale model for predicting statistical distributions of hydrochemical and microbial indicators in river. *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 504. P. 104–114 (In Russ.).
12. Bogomolov, A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin, Y.S., Grebeneva M.G. Features of fluctuations in the vertical structures of mineralization fields in the Kama Reservoir during the summer low-water period in the area of Berezniki. *Mountain Echo*. 2021. No. 4. Pp. 3–11. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.1> (In Russ.).
13. Lepikhin A.P. On the history of the development of systems for regulating technogenic impacts on water bodies. On the history of the development of systems for regulating technogenic impacts on water bodies. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 2. Pp. 59-71. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-4 (In Russ.).
14. Cherkinsky S.N. Sanitary conditions for the discharge of wastewater into water bodies. Publishing house of the MKH RSFSR, 1947. 92 p. (In Russ.).
15. Novotsky N.V., Zograf N.A. Estimation of errors of measurement results. L. Energoatomizdat, 2nd ed., L.O., 1991. 304 p. (In Russ.).
16. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical fluid mechanics. M.: Nauka, 1965. 639 p. (In Russ.).
17. Chalov S.R., Yefimov V.A. Granulometric composition of suspended sediments: characteristics, classifications, spatial variability. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2021. No. 4. Pp. 91-103 (In Russ.).
18. Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. M.: Fizmatlit, 2006. 816 p. (In Russ.).

#### **Сведения об авторах:**

**Лепихин Анатолий Павлович**, д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: [lepikhin49@mail.ru](mailto:lepikhin49@mail.ru)

**Синцова Татьяна Николаевна**, ведущий инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-0327-4894; e-mail: [tanya\\_sinzova@mail.ru](mailto:tanya_sinzova@mail.ru)

#### **About the authors**

**Anatoly P. Lepikhin**, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Chief Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113; Perm, 614002, Russia; Head of the Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID:0000-0001-9874-3424; email: [lepikhin49@mail.ru](mailto:lepikhin49@mail.ru)

**Tatyana N. Sintsova**, Leading Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-0327-4894; email: [tanya\\_sinzova@mail.ru](mailto:tanya_sinzova@mail.ru)