

СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ВНУТРИСУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ
(НА ПРИМЕРЕ КАМСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА)*

Т.Н. Синцова, *Горный институт УрО РАН*

А.П. Лепихин, *Горный институт УрО РАН*

О.М. Розенталь, *Институт водных проблем РАН*

Л.Ю. Левин, *Горный институт УрО РАН*

А.В. Богомолов, *Горный институт УрО РАН*

Для цитирования:

Синцова Т.Н., Лепихин А.П., Розенталь О.М., Левин Л.Ю., Богомолов А.В. Статистические аспекты внутрисуточных колебаний показателей качества воды (на примере Камского водохранилища) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – №4. – С. 17–35. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.2>

Водные объекты, расположенные в зонах активного техногенеза, характеризуются существенной временной изменчивостью гидрохимических показателей качества воды. При проведении традиционного мониторинга водных объектов с отбором проб воды стандартными батометрами определяются значения контролируемых показателей качества воды, как правило, с характерным временным усреднением ~ 10 секунд. Возникает проблема, как данные показатели соотносятся с их среднесуточными значениями. Каков должен быть минимальный период усреднения, для того чтобы получать объективные среднесуточные значения рассматриваемых показателей качества воды? В работе для решения данной задачи рассмотрено применение дисперсионного анализа ежесекундных и 5-минутных наблюдений электропроводности и мутности воды для двух участков Камского водохранилища: в районе Чусовского плеса г. Перми и в районе г. Березники. Показано, что необходимо проводить контроль качества воды на основе оценки не «мгновенных», а интегральных методов отбора проб с временным масштабом усреднения не менее 10 минут для Камского водохранилища в районе г. Перми. В то же время для Камского водохранилища в районе г. Березники подтверждается необходимость проведения отбора проб интегральным методом с усреднением не менее 1.5 минут.

* Сбор полевых материалов и первичная их статистическая обработка выполнены при финансовой поддержке РФ в рамках проекта № 19-77-30008П; дисперсионный анализ материалов выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Горного института УрО РАН «Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования» (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6), также в рамках темы № FMWZ-2025-0002 государственного задания ИВП РАН (номер государственной регистрации 125030703344-8).

Ключевые слова: дисперсионный анализ, среднее арифметическое, дисперсия, Камское водохранилище.

Введение

В настоящее время в связи с внедрением современных методов измерения, кроме межгодовой и сезонной динамики показателей качества воды в водных объектах, расположенных в зонах активного техногенеза, принципиально важное значение приобретают внутрисуточные короткопериодные колебания, формирующиеся не только в результате внешних факторов, но и внутриводоемных процессов, связанных с их разбавлением, миграцией и трансформацией. Поэтому в работе выполнены анализ и оценка внутрисуточной изменчивости показателей качества воды для решения такой актуальной практической задачи, как оценка объективности результатов мониторинга, построенного на «мгновенном», разовом контроле качества.

При этом возникает естественный вопрос: как корректно оценивать результаты измерений, если пробы воды отбираются каждый день с частотой 1/с и в результате наблюдается их существенная изменчивость, какая должна быть технология отбора, для того чтобы при минимуме затрат получить корректные оценки? Для того, чтобы ответить на данный вопрос, в работе был проведен дисперсионный анализ с целью выявления устойчивого периода колебаний показателей качества воды, не имеющих значимых статистических различий с учетом их внутрисуточной изменчивости, на примере Камского водохранилища.

Весь спектр контролируемых показателей невозможно определить с частотой, соответствующей колебаниям показателей качества воды. Такой контроль возможен только при использовании автоматических систем, оснащенных физическими методами измерения.

В настоящее время рассматриваемые технологии отработаны для оценки удельной электропроводности и мутности воды. В то же время многочисленные исследования [1-3] показывают, что эти показатели статистически достаточно хорошо связаны с большинством лимитирующих показателей качества воды. Поэтому выводы, получаемые для этих двух показателей, могут быть перенесены и на показатели качества воды, определяемые химическим методом.

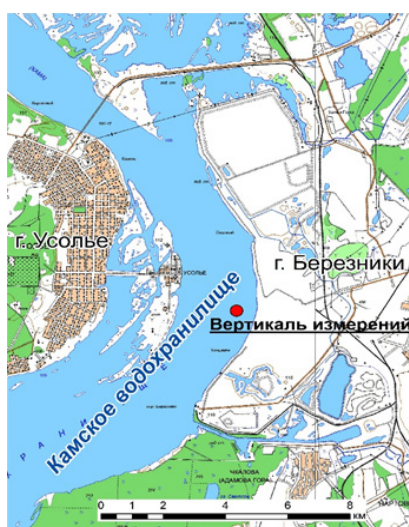
Задачей проведения мониторинга водных объектов является оценка их состояния для возможной реализации определенных видов водопользования. При этом в качестве лимитирующих показателей в первую очередь выступают химические и физические показатели качества воды, колебания которых характеризуются не только пространственной, но и временной неоднородностью. Поэтому планирование мониторинга должно проводиться с учетом рассматриваемых параметров.

В работе на основе дисперсионного анализа показано, что использовать данные ежесекундных натуральных наблюдений электропроводности и мутности воды необходимо с усреднением минимум в 10 минут в районе Чусовского плеса г. Перми и в 1.5 минуты в районе г. Березники, а данные 5-минутных – с усреднением в 2.5 часа в районе г. Березники. Этого можно достичь применением интегрального метода отбора проб. При этом необходимо подчеркнуть, что масштабы временного усреднения могут существенно варьировать в зависимости от особенностей гидродинамики исследуемых водных объектов.

Материалы и методы

В работе использовались материалы полевых натуральных наблюдений ежесекундных колебаний значений электро-

проводности и мутности воды на Камском водохранилище в районе Чусовского плеса г. Перми и ежесекундных и 5-минутных колебаний – в районе г. Березники с использованием MIDAS ECM [13] в 2021 и 2022 гг. в течение 1 суток (рис. 1а, б). На Камском водохранилище наблюдается значительная внутригодовая динамика изменения уровней воды, которые в отдельные годы превышают 7 метров.



а



б

Рис. 1. Карта – схема Камского водохранилища в районе г. Березники (а) и Чусовского плеса г. Перми (б)

Первый исследуемый участок – участок Камского водохранилища в районе г. Березники, находящийся в зоне переменного подпора от Камской ГЭС. Зона выклинивания подпора здесь при сработке водохранилища перемещается вниз по течению, как правило, это наблюдается в период предвесенней сработки уровня, в этот период для данного участка характерны речные условия. В районе г. Березники период естественного режима уровня составляет от 1 до 3.5 месяца. При уровнях, близких к НПУ (нормальный подпорный уровень), подпор распространяется до района пгт. Тюлькино – п. Керчевский. Характерной особенностью данного участка водохранилища (рис. 1а) является очень высокая техногенная нагрузка, связанная как с точечными, так и с диффузными источниками загрязнения. Для этой зоны характерны фильтрационные разгрузки подземных высокоминерализованных вод как естественного, так и техногенного генезиса.

Второй исследуемый участок – Чусовской плес Камского водохранилища, находящийся в зоне постоянного подпора от плотины Камской ГЭС (рис. 1б). Чусовской плес образован слиянием рек Сылвы и Чусовой. Как показали ранее выполненные исследования [1-3, 14], в зимний период данный участок Камского водохранилища характеризуется значительной вертикальной стратификацией водных масс, связанной с тем, что в зимний период реки переходят на подземный режим питания и более минерализованные, более плотные воды р. Сылвы подтекают под менее плотные, имеющие меньшую жесткость воды реки Чусовой, создавая тем самым слой плотностного скачка. В зимний период в условиях достаточно однородного распределения температуры воды, как по глубине, так и по акватории водного объекта, определяющим фактором устойчивой стратификации является минерали-

зация воды. Однако общая минерализация воды, являясь химическим показателем, требует для своего определения достаточно сложной процедуры. Вследствие этого при проведении полевых исследований значительно более удобно использовать непосредственно измеряемый показатель – удельную электропроводность воды. Поэтому измерения были выполнены с использованием этого показателя на основе многопараметрического измерителя Midas ЕСМ. Основными преимуществами применения этого показателя являются его очень хорошая линейная связь с минерализацией (коэффициент корреляции Пирсона = 0,96) и минимальные возмущения в водную массу при проведении его измерений, соответственно, небольшие значения метрологической погрешности.

В результате выполненных полевых наблюдений выявлено, что на участке

Камского водохранилища в районе основного питьевого водозабора г. Перми – Чусовских очистных сооружений (ЧОС) – наблюдаются волнообразные ежесекундные колебания мутности и электропроводности с амплитудой, достигающей в ряде случаев приблизительно 50% измеряемой величины (рис. 2).

Как видно из рисунка 3, в районе г. Березники амплитуда ежесекундных колебаний мутности воды не превышает 30%, более существенны резкие изменения значений удельной электропроводности, превышающие 100%.

При этом амплитуда 5-минутных колебаний удельной электропроводности не превышает 10%, более значимые колебания характерны для мутности, однако и они составляют около 20%, что существенно меньше при наличии плотностной стратификации (рис. 4).

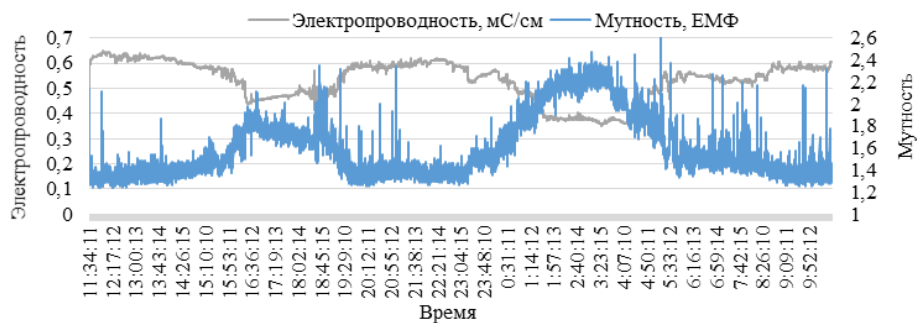


Рис. 2. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми при $v=1/c$ (28-29.01.21)

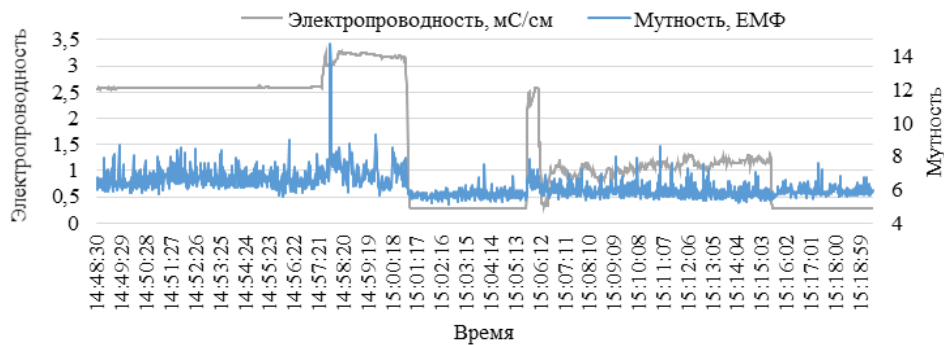


Рис. 3. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники при $v=1/c$ (14.10.22)

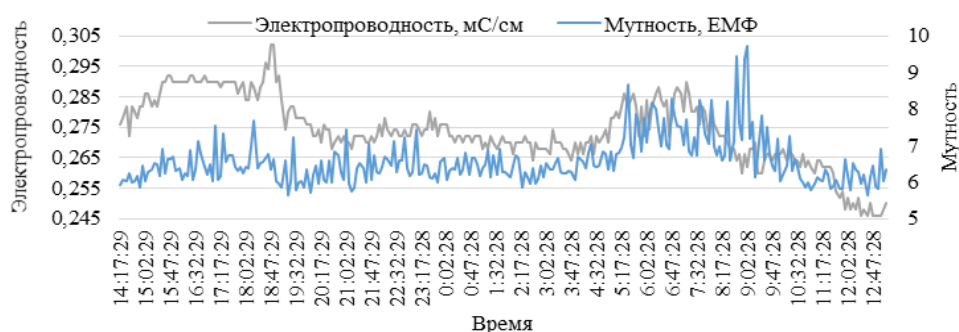


Рис. 4. График хода мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники при $v=12/\text{час}$ (13-14.09.25) (б)

Для оценки внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды для Камского водохранилища была использована определенная методика обработки трех первичных рядов по мутности и трех по электропроводности (рис. 2-4) для образования выборок разовых значений и выборок усредненных значений по подгруппам с помощью дисперсионного анализа (ANOVA):

1. Были взяты первичные ряды ежедневных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе ЧОС г. Перми (рис. 2) при объеме выборки $N=8279$ за период наблюдений 11:34:11 28.01 – 10:33:15 29.01.2021 г. Для этого каждый первичный ряд наблюдений $C_{\text{перв}}$ был разделен на три подгруппы по 10, 60 и 600 значений (уровни времени продолжительности). Каждая группа была образована по двум вариантам группирования (характер выборки) в первичном ряду наблюдений: усредненный ряд – усреднением по 10, 60 и 600 значений ($C_{\text{уср } 10}$, $C_{\text{уср } 60}$, $C_{\text{уср } 600}$); выборочный ряд – выборочно взято каждое 10, 60 и 600 значения ($C_{\text{выб } 10}$, $C_{\text{выб } 60}$, $C_{\text{выб } 600}$).

2. На основе первичных рядов ежедневных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе г. Березники (рис. 3) при $N=1861$ за 14:48:30 – 15:19:30 14.10.2022 г. проводился анализ для трех независимых групп в двух вариантах группировки (выборочный, усред-

ненный ряды): усредненный ряд по 30, 60 и 90 значений ($C_{\text{уср } 30}$, $C_{\text{уср } 60}$, $C_{\text{уср } 90}$); выборочный ряд – 30, 60, 90 значения ($C_{\text{выб } 30}$, $C_{\text{выб } 60}$, $C_{\text{выб } 90}$).

3. Выполнен анализ на основе первичных рядов 5-минутных наблюдений мутности и электропроводности воды в районе г. Березники (рис. 4) при $N=276$ за 14:17:29 13.09 – 13:12:28 14.09.2021 г. для трех независимых групп (по 3, 10 и 30 значений) в двух вариантах группировки (выборочный, усредненный ряды): усредненный ряд по 3, 10 и 30 значений ($C_{\text{уср } 3}$, $C_{\text{уср } 10}$, $C_{\text{уср } 30}$); выборочный ряд – 3, 10, 30 значения ($C_{\text{выб } 3}$, $C_{\text{выб } 10}$, $C_{\text{выб } 30}$).

Перед применением дисперсионного анализа выборки проверяются на нормальность распределения с помощью критериев Колмогорова, Шапиро-Уилка. При выполнении условия нормальности применяется дисперсионный анализ, где для вычисления статистики критерия Фишера F необходимо рассчитать средний квадрат отклонений между группами (межгрупповую дисперсию) и средний квадрат отклонений внутри групп (внутригрупповую дисперсию) между выборками. Необходимо определить, есть ли различия между взятыми выборками в исследуемых группах. Нулевой гипотезой служит гипотеза об отсутствии различий между средними значениями мутности и электропроводности воды в воде Камского водохранилища в исследуемых

группах. Если условие нормальности не выполняется, то применяем непараметрический критерий Краскела-Уоллиса для сравнения медианы групп.

Результаты и обсуждение

Качество воды в поверхностных водных объектах определяется очень широким комплексом факторов, поэтому они характеризуются большим диапазоном изменения. При этом значимо выделяются как внутригодовые колебания, связанные с сезонностью гидрологических и гидрохимических процессов, так и достаточно кратковременные, обусловленные турбулентными и когерентными колебаниями водных масс. Для основных видов водопользования характерна определенная инерционность в восприятии качества воды.

В то же время для сопоставимости последовательных измерений необходим учет и «нивелирование» быстрых колебаний. Для этого следует рассматривать и сопоставлять временной масштаб результатов анализа проб воды, отобранных интегральным способом T_{Cummi} , с характерным временем усреднения T_{Ci} , принципиально важно, чтобы $\Delta T_{Cummi} \gg \Delta T_{Ci}$. К сожалению, традиционные методы отбора проб воды с использованием стандартных батометров и пробоотборников не обеспечивают такую возможность [4-12].

Если долгопериодные колебания могут быть нивелированы путем увеличения частоты отбора проб, то основным инструментом нивелирования короткопериодных колебаний является использование интегрального отбора проб воды с характерным временем забора воды $\Delta T_{забCi} \gg \Delta T_{Ci}$. Характерными временными масштабами для планирования и реализации мониторинга поверхностных водных объектов являются:

– время статистически значимого изменения содержания i -показателя (C_i) вследствие долгопериодных колебаний (сезонных колебаний)

$$T_{cCi} = \left(\frac{1}{C_i} \left(\frac{\partial C_i}{\partial T} \right) \right)^{-1};$$

– временной масштаб изменения i -показателя качества воды, обусловленный турбулентными пульсациями $T_{турpCi}$;

– временной масштаб забора пробы воды традиционным методом T_{mpCi} ;

– временной масштаб усреднения для j -вида водопользования $T_{ВПj}$;

– временной масштаб изменения факторов, определяющих колебания химических, физических показателей качества воды поверхностных водных объектов $T_{фCi}$.

Для оценки эффективности действующей системы мониторинга водных объектов введем и проанализируем параметры, определяющие особенности формирования внутрисуточных колебаний показателей качества воды:

– среднеквадратическое отклонение измерения (метрологическая ошибка) $\sigma_{из i}$;

– среднеквадратическая изменчивость, обусловленная краткосрочными колебаниями $\sigma_{воз i}$;

– долгопериодная изменчивость i -ингредиента ΔC_{ii} , где $\Delta C_{i\Delta t_{1,2}} = |C_{t_2} - C_{t_1}|$;

– характерное время короткопериодных колебаний $\tau_{кп i}$;

– характерная продолжительность единичного отбора проб воды на i -показатель $\tau_{заб i}$;

– характерный период между смежными отборами проб воды на i -показатель $\tau_{пер i}$.

Если $\sigma_{из i} \gg \sigma_{воз i}$, $\sigma_{из i} \ll \Delta C_{ii,2}$, то роль короткопериодных внутрисуточных колебаний показателей качества воды мала и основной интерес представляют долговременные сезонные колебания. Соответственно, величина $\tau_{заб}$ практически не

играет никакой роли, и она не учитывается при планировании мониторинга, при этом необходимо, чтобы

$$\tau_{\text{непр}} \leq \left| \frac{1}{C_i} \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|^{-1}.$$

Ситуация принципиально меняется, если $\sigma_{\text{из}}^2 \leq \sigma_{\text{воз}}^2$. В этом случае для получения корректных оценок характерных значений показателей качества воды необходимо, чтобы $\tau_{\text{заб } i} \gg \tau_{\text{к } i}$. При этом благодаря центральной предельной теореме (далее – ЦПТ) можно получить объективные оценки качества воды, так как при отборе

проб воды $\tau_{\text{заб } i} < 20$ с, соответственно, $\tau_{\text{к } i} > \tau_{\text{заб } i}$, возникают серьезные проблемы с идентификацией получения оценок состояния водных объектов.

Результаты статистической обработки выборок мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми с частотой измерения $\nu=1/\text{с}$ показали, что значения коэффициентов вариации колебаний мутности воды весьма небольшие: $C\nu \approx 0.144 - 0.174$, так и электропроводности: $C\nu \approx 0.142 - 0.158$ (табл. 1).

Таблица 1.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Мутность, ЕМФ ($\nu=1/\text{с}$)									
<i>Сперв</i>	8279	1.602	1.488	1.238	3.000	0.279	0.174	1.045	0.070
<i>Свыб 10</i>	828	1.606	1.488	1.250	2.338	0.273	0.170	1.012	-0.086
<i>Свыб 60</i>	138	1.598	1.482	1.288	2.263	0.270	0.169	0.939	-0.247
<i>Свыб 600</i>	14	1.632	1.526	1.375	2.188	0.235	0.144	1.037	0.625
<i>Суср 10</i>	828	1.602	1.492	1.292	2.314	0.269	0.168	1.091	0.046
<i>Суср 60</i>	138	1.602	1.503	1.323	2.271	0.267	0.166	1.114	0.128
<i>Суср 600</i>	14	1.599	1.540	1.358	2.181	0.260	0.163	1.274	0.840
Электропроводность, мСм/см ($\nu=1/\text{с}$)									
<i>Сперв</i>	8279	0.530	0.552	0.352	0.648	0.079	0.150	-0.780	-0.521
<i>Свыб 10</i>	828	0.530	0.552	0.356	0.642	0.079	0.149	-0.783	-0.506
<i>Свыб 60</i>	138	0.529	0.553	0.360	0.642	0.080	0.150	-0.784	-0.498
<i>Свыб 600</i>	14	0.520	0.545	0.364	0.622	0.082	0.158	-0.776	-0.463
<i>Суср 10</i>	828	0.530	0.552	0.357	0.643	0.079	0.149	-0.779	-0.523
<i>Суср 60</i>	138	0.530	0.550	0.361	0.639	0.079	0.149	-0.789	-0.497
<i>Суср 600</i>	14	0.531	0.546	0.373	0.625	0.075	0.142	-0.804	-0.106

Для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=1/\text{с}$ установлено, что значения коэффициентов вариации $C\nu$ колебаний мутности воды незначительные (0.078-0.113), в отличие от электропроводности: $C\nu \approx 0.7$ (табл. 2).

Результаты статистической обработки выборок мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в ра-

йоне г. Березники с частотой измерения $\nu=12/\text{час}$ показали, что значения коэффициентов вариации колебаний мутности воды тоже небольшие для всех выборок: $C\nu \approx 0.066-0.096$, как и для электропроводности: $C\nu \approx 0.04-0.047$ (табл. 3).

Характерной особенностью ежесекундных колебаний электропроводности для Камского водохранилища в районе г. Берез-

Таблица 2.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=1/\text{час}$

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Электропроводность, мСм/см ($\nu=1/\text{с}$)									
С _{перв}	1861	1.532	1.148	0.270	3.272	1.074	0.701	0.182	-1.560
С _{выб 30}	63	1.509	1.110	0.270	3.242	1.091	0.723	0.189	-1.621
С _{выб 60}	32	1.476	1.108	0.270	3.242	1.121	0.760	0.251	-1.670
С _{выб 90}	21	1.527	1.110	0.270	3.212	1.130	0.740	0.161	-1.773
С _{уср 30}	63	1.512	1.146	0.271	3.235	1.063	0.703	0.214	-1.543
С _{уср 60}	32	1.493	1.168	0.272	3.231	1.052	0.704	0.262	-1.480
С _{уср 90}	21	1.512	1.129	0.272	3.200	1.042	0.689	0.307	-1.480
Мутность, ЕМФ ($\nu=1/\text{с}$)									
С _{перв}	1861	6.249	6.063	5.150	14.725	0.708	0.113	2.862	21.347
С _{выб 30}	63	6.204	6.075	5.400	7.575	0.575	0.093	0.772	-0.312
С _{выб 60}	32	6.094	5.975	5.400	7.125	0.490	0.080	0.563	-0.618
С _{выб 90}	21	6.210	6.075	5.400	7.550	0.604	0.097	0.635	-0.650
С _{уср 30}	63	6.246	6.002	5.586	8.066	0.508	0.081	1.036	1.129
С _{уср 60}	32	6.242	6.000	5.648	7.723	0.490	0.078	1.049	0.907
С _{уср 90}	21	6.245	6.006	5.716	7.529	0.485	0.078	1.068	0.608

Таблица 3.

Статистические характеристики мутности и электропроводности воды для Камского водохранилища в районе г. Березники с частотой измерения $\nu=12/\text{час}$

Название	Объем выборки	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Эксцесс
Электропроводность, мСм/см ($\nu=12/\text{час}$)									
С _{перв}	276	0.274	0.272	0.246	0.302	0.011	0.040	-0.257	0.190
С _{выб 3}	92	0.274	0.272	0.246	0.302	0.011	0.041	-0.241	0.309
С _{выб 10}	28	0.273	0.272	0.246	0.292	0.011	0.042	-0.385	0.378
С _{выб 30}	10	0.273	0.274	0.246	0.292	0.012	0.045	-0.948	2.204
С _{уср 3}	92	0.274	0.273	0.246	0.298	0.011	0.040	-0.310	0.259
С _{уср 10}	28	0.274	0.273	0.247	0.291	0.011	0.041	-0.481	0.406
С _{уср 30}	10	0.272	0.272	0.247	0.290	0.013	0.047	-0.586	0.344
Мутность, ЕМФ ($\nu=12/\text{час}$)									
С _{перв}	276	6.569	6.413	5.638	9.713	0.631	0.096	1.791	4.737
С _{выб 3}	92	6.526	6.375	5.638	9.713	0.623	0.095	2.066	7.019
С _{выб 10}	28	6.574	6.444	5.638	7.825	0.558	0.085	0.906	0.262
С _{выб 30}	10	6.440	6.375	5.638	7.313	0.563	0.087	0.427	-0.875
С _{уср 3}	92	6.569	6.444	5.875	8.184	0.504	0.077	1.338	1.394
С _{уср 10}	28	6.564	6.447	6.013	7.812	0.464	0.071	1.434	1.376
С _{уср 30}	10	6.542	6.412	6.132	7.435	0.434	0.066	1.514	1.188

ники является ее положительная асимметрия ($As \approx 0.2 - 0.3$), а для г. Перми с $\nu=1/\text{с}$ и г. Березники с $\nu=12/\text{час}$ присуща существенная отрицательная асимметрия ($As_{\text{Пермь}} \approx -0.8$; $As_{\text{Березники}} \approx -0.2 - -0.9$), что естественно, такая ситуация с позиции обе-

спечения надежности выполнения регламентных нормативов весьма благоприятна.

Распределение ежесекундных колебаний мутности воды в районе г. Березники характеризуется положительной, но более высокой, статистически значимой

асимметрией ($As \sim 0.6 - 2.9$), в отличие от электропроводности, а в районах г. Перми с $v=1/c$ и г. Березники с $v=12/\text{час}$ – положительной асимметрией ($As_{\text{Пермь}} \approx 1.3$; $As_{\text{Березники}} \approx 0.4 - 2.1$). Безусловно, контролю содержания мутности должно уделяться повышенное внимание.

При проведении статистической обработки ежесекундных и 5-минутных колебаний показателей качества воды необходимо использовать не традиционные статистические критерии, которые в данном случае не работают, а применять более устойчивые к отклонениям от нормального распределения методы, такие как дисперсионный анализ. При этом в настоящее время дисперсионный анализ не так часто применяется для сравнения средних значений показателей качества воды поверхностных водных объектов, расположенных в зонах активного техногенеза, так как отсутствуют достаточно длительные ряды наблюдений.

Дисперсионный анализ считается более устойчивым, по сравнению с использованием множественных сравнений с помощью t -критерия, потому что риск ошибки первого рода для многократного применения t -критерия больше, чем указанный уровень значимости для каждого t -критерия по отдельности. Это приводит к несостоятельности статистических оценок и к получению ложнодостоверных результатов, то есть обнаружению статистически значимых различий там, где их на самом деле нет.

В данной статье в процессе дисперсионного анализа сопоставляются дисперсии исследуемого показателя: межгрупповая, обусловленная различием групп (средних значений), и внутригрупповая, вызванная случайными причинами. Чем больше частное, полученное в результате деления межгрупповой дисперсии на внутригрупповую дисперсию (F -критерий), тем больше различаются средние значения сравниваемых

выборок и тем выше статистическая значимость этого различия. При этом для применения дисперсионного анализа необходимо выполнение следующих условий:

1. Выборки должны быть статистически независимыми, т.е. их коэффициент корреляции = 0.

2. Колебания исследуемых показателей качества воды должны описываться нормальным распределением, а, соответственно, и дисперсии исследуемых показателей должны быть равны. Для проверки принципиальных статистических различий предлагается применять критерии нормальности Шапиро-Уилка и Колмогорова. Если эти условия не соблюдаются, то необходимо переходить на непараметрические критерии, например, критерий Краскала-Уоллиса.

Для выполнения дисперсионного анализа необходимо проверить, можно ли применять этот критерий.

Проверка условий нормальности распределения электропроводности и мутности воды на основе критериев Колмогорова и Шапиро-Уилка

Для проверки условий нормальности распределения электропроводности и мутности воды использовались статистические критерии Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро-Уилка [15], позволяющие принять или отвергнуть нулевую гипотезу о нормальном законе распределения. При этом выборки будут описываться нормальным законом распределения согласно ЦПТ только в том случае, если процессы определяются:

– воздействием большого количества факторов N ;

– динамикой каждого из определяющих факторов, которые статистически независимы, т.е. $R_{N_i, N_j} \equiv 0$;

– тем, что во множестве определяющих факторов отсутствуют доминирующие, т.е.

$$\frac{x_{\max i}}{N} \rightarrow 0$$

$$\sum_{i=1}^N x_i$$

где $x_{\max i}$ – воздействие самого значимого фактора.

Результаты тестов Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро-Уилка (табл. 4) показали, что не все выборки имеют нормальное распределение для Камского водохранилища:

1. Выявлено в результате оценки еже-секундных колебаний мутности и электропроводности воды в районе Чусовского плеса г. Перми, что выборочный $C_{\text{выб } 600}$ и усредненный $C_{\text{уср } 600}$ ряды при уровне времени продолжительности в 600 значений, т.е. выборки с усреднением в 10 минут, можно считать нормально распределенными. Выборочные ($C_{\text{выб } 10}$ и $C_{\text{выб } 60}$) и усредненные ($C_{\text{уср } 10}$ и $C_{\text{уср } 60}$) ряды при уровне времени продолжительности в 10 и 60 зна-

Таблица 4.

Критерии оценки нормальности распределения содержания электропроводности и мутности воды для Камского водохранилища

Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка	Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка	Название	Критерий Колмогорова-Смирнова	Критерий Шапиро-Уилка
1. участок Камского водохранилища в районе Чусовского плеса г. Перми (v=1/с)			2. участок Камского водохранилища в районе г. Березники (v=1/с)			3. участок Камского водохранилища в районе г. Березники (v=12/час)		
Электропроводность воды								
Сперв	0,137, p<0.01	-	Сперв	0,236, p<0.01	0,839, p=0	Сперв	0,112, p<0.01	0,963, p=0
C _{выб 10}	0,136, p<0.01	0,899, p=0	C _{выб 30}	0,244, p<0.01	0,83, p=0	C _{выб 3}	0,104, p< n.s.	0,966, p=0.02
C _{выб 60}	0,137, p<0.05	0,896, p=0	C _{выб 60}	0,242, p<0.05	0,823, p=0,0001	C _{выб 10*}	0,122, p< n.s.	0,943, p=0,129
C _{выб 600*}	0,2, p<n.s.	0,891, p=0,08	C _{выб 90*}	0,251, p<0,1	0,825, p=0,002	C _{выб 30*}	0,179, p<n.s.	0,932, p=0,463
C _{уср 10}	0,131, p<0.01	0,899, p=0	C _{уср 30}	0,237, p<0.01	0,843, p=0	C _{уср 3*}	0,076, p< n.s., Lilliefors-p < 1	0,966, p=0,018
C _{уср 60}	0,138, p<0.05	0,897, p=0	C _{уср 60*}	0,222, p<0,1	0,854, p=0,0005	C _{уср 10*}	0,1, p< n.s.	0,953, p=0,24
C _{уср 600*}	0,189, p< n.s.	0,929, p=0,3	C _{уср 90*}	0,246, p< 0,1	0,849, p=0,0042	C _{уср 30*}	0,184, p< n.s.	0,952, p=0,697
Мутность воды								
Сперв	0,172, p<0.01	-	Сперв	0,114, p<0.01	0,82, p=0	Сперв	0,13, p<0.01	0,862, p=0
C _{выб 10}	0,184, p<0.01	0,867, p=0	C _{выб 30}	0,119, p< n.s.	0,922, p=0,0007	C _{выб 3}	0,154, p<0.05	0,843, p=0
C _{выб 60}	0,185, p<0.01	0,872, p=0	C _{выб 60*}	0,115, p< n.s.	0,943, p=0,094	C _{выб 10}	0,186, p< n.s.	0,912, p=0,02
C _{выб 600*}	0,23, p< n.s., Lilliefors-p < 0.05	0,862, p=0,03	C _{выб 90*}	0,227, p< 0,15	0,913, p=0,06	C _{выб 30*}	0,184, p< n.s.	0,936, p=0,511
C _{уср 10}	0,179, p<0.01	0,84, p=0	C _{уср 30}	0,215, p<0.01	0,887, p=0,00003	C _{уср 3}	0,169, p<0.05	0,873, p=0
C _{уср 60}	0,214, p<0.01	0,833, p=0	C _{уср 60}	0,243, p<0.05	0,88, p=0,002	C _{уср 10}	0,263, p<0.05	0,829, p=0,0004
C _{уср 600*}	0,198, p< n.s., Lilliefors-p < 0.15	0,839, p=0,02	C _{уср 90*}	0,255, p< 0,1	0,85, p=0,005	C _{уср 30*}	0,331, p< 0,2	0,779, p=0,008

* подчиняются нормальному закону распределения

чений, т.е. выборки с усреднением в 10 секунд и 1 минуту, не описываются нормальным распределением.

2. Показано для ежесекундных колебаний мутности воды в районе г. Березники, что только усредненный ряд $C_{уср 90}$ и выборочные $C_{выб 60}$, $C_{выб 90}$ нормально распределенные, при уровне времени продолжительности в 60 и 90 значений, т.е. с усреднением в 1 и 1.5 минуты. Для ежесекундных колебаний электропроводности нормальным распределением описываются выборочные ряды $C_{выб 90}$ и усредненные $C_{уср 60}$, $C_{уср 90}$ при уровне времени продолжительности в 60 и 90 значений, т.е. выборки с усреднением в 1 и 1.5 минуты.

3. Установлено для 5-минутных колебаний электропроводности в районе г. Березники, что только усредненные ряды $C_{уср 3}$, $C_{уср 10}$, $C_{уср 30}$ и выборочные $C_{выб 10}$, $C_{выб 30}$ нормально распределены, при уровне времени продолжительности в 3, 10 и 30 значений. Для 5-минутных колебаний мутности воды нормальному закону распределения подчиняются выборочные ряды $C_{выб 30}$ и усредненные $C_{уср 30}$ при уровне времени продолжительности в 30 значений, т.е. выборки с усреднением в 2.5 часа.

Поэтому для корректной и объективной оценки влияния ежесекундных колебаний на характер времени продолжительности (масштаб усреднения) с учетом характера выборки (выборочный, усредненный ряды) представляется необходимым использовать непараметрические методы, например, критерий Краскела-Уоллиса.

Дисперсионный анализ результатов выполненных исследований проведен поэтапно на основе критериев Фишера (F), Краскела-Уоллиса ($KW-H$), реализованных в программе Statistica [16]. На первом этапе поочередно учитывалось взаимодействие уровней времени про-

должительности (масштаба усреднения) и характера выборки (выборочный, усредненный ряд) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности (первичный ряд) при отсутствии совместного влияния уровней времени продолжительности. На втором этапе учитывалось влияние ежесекундных и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности на характер выборки с учетом совместного влияния уровней времени продолжительности.

Дисперсионный анализ поочередного влияния времени продолжительности и характера выборки на ежесекундные и 5-минутные колебания физических показателей качества воды (1 этап)

На первом этапе был проведен дисперсионный анализ с помощью параметрического критерия Фишера, используемого для сравнения средних значений всех выборок, и непараметрического критерия Краскела-Уоллиса для сравнения медианы всех групп, ввиду невыполнения условий нормальности распределения.

При этом поочередно учитывалось взаимодействие уровней времени продолжительности (масштаба усреднения) и характера выборки (выборочный, усредненный ряд) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности (первичный ряд) без учета совместного влияния масштаба усреднения.

Статистика критериев Фишера и Краскела-Уоллиса на примере Камского водохранилища показывает (табл. 5), что нет статистически значимых различий средних значений и медиан при поочередном сравнении различных масштабов усреднения выборочного, усредненного рядов на первичный ряд ежесекундных и 5-минутных значений мутности и электропроводности, т.е. для всех выборок p -значение оказывается больше 0.05.

Результаты дисперсионного анализа выявили отсутствие для всех выборок статистически значимых различий средних значений в исследуемых рядах, например, для Камского водохранилища в районе г. Перми (рис. 5).

Таким образом, результаты дисперсионного анализа подтвердили отсутствие влияния ежесекундных и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности

(первичный ряд) на характер выборки (выборочный, усредненный ряд).

В дальнейшем для более подробного дисперсионного анализа рассмотрено совместное влияние уровней времени продолжительности (масштаба усреднения) и типа выборки (выборочный, усредненный ряд) на характер колебаний мутности и электропроводности (первичный ряд).

Таблица 5.

Критерии оценки различий средних значений *F* и медианы *KW-H* для выборок мутности и электропроводности воды Камского водохранилища

Наименование групп	$S_{в\text{ьб}} + S_{у\text{ср}} + S_{п\text{ерв}}$		
в районе Чусовского плеса г. Перми			
Название	$S_{в\text{ьб } 10} + S_{у\text{ср } 10} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 60} + S_{у\text{ср } 60} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 600} + S_{у\text{ср } 600} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;9932) = 0.002;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;9935) = 0.004;$ $p = 0.99$	$F(2;8552) = 0.006;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;8555) = 0.009;$ $p = 0.99$	$F(2;8304) = 0.1;$ $p = 0.90$ $KW-H(2;8307) = 0.22;$ $p = 0.89$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;9932) = 0.06;$ $p = 0.95$ $KW-H(2;9935) = 0.95;$ $p = 0.62$	$F(2;8552) = 0.02;$ $p = 0.99$ $KW-H(2;8555) = 0.08;$ $p = 0.96$	$F(2;8304) = 0.08;$ $p = 0.92$ $KW-H(2;8307) = 1.28;$ $p = 0.53$
в районе г. Березники ($v=1/c$)			
Название	$S_{в\text{ьб } 30} + S_{у\text{ср } 30} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 60} + S_{у\text{ср } 60} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 90} + S_{у\text{ср } 90} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;1984) = 0,02;$ $p = 0,98$ $KW-H(2;1987) = 0,08;$ $p = 0,96$	$F(2;1922) = 0,06;$ $p = 0,94$ $KW-H(2;1925) = 0,28;$ $p = 0,87$	$F(2;1900) = 0,004;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;1903) = 0,002;$ $p = 0,99$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;293) = 0,21;$ $p = 0,81$ $KW-H(2;296) = 0,35;$ $p = 0,84$	$F(2;1922) = 0,77;$ $p = 0,46$ $KW-H(2;1925) = 1,55;$ $p = 0,46$	$F(2;1900) = 0,03;$ $p = 0,97$ $KW-H(2;1903) = 0,49;$ $p = 0,78$
в районе г. Березники ($v=12/\text{час}$)			
Название	$S_{в\text{ьб } 3} + S_{у\text{ср } 3} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 10} + S_{у\text{ср } 10} + S_{п\text{ерв}}$	$S_{в\text{ьб } 30} + S_{у\text{ср } 30} + S_{п\text{ерв}}$
Электропроводность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;457) = 0,002;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;460) = 0,001;$ $p = 0,99$	$F(2;329) = 0,06;$ $p = 0,94$ $KW-H(2;332) = 0,14;$ $p = 0,93$	$F(2;293) = 0,19;$ $p = 0,82$ $KW-H(2;296) = 0,19;$ $p = 0,91$
Мутность воды			
Критерий Фишера <i>F</i> Критерий Краскела – Уоллиса <i>KW-H</i>	$F(2;457) = 0,19;$ $p = 0,83$ $KW-H(2;460) = 1,16;$ $p = 0,56$	$F(2;329) = 0,002;$ $p = 0,99$ $KW-H(2;332) = 0,27;$ $p = 0,87$	$F(2;293) = 0,21;$ $p = 0,81$ $KW-H(2;296) = 0,35;$ $p = 0,84$

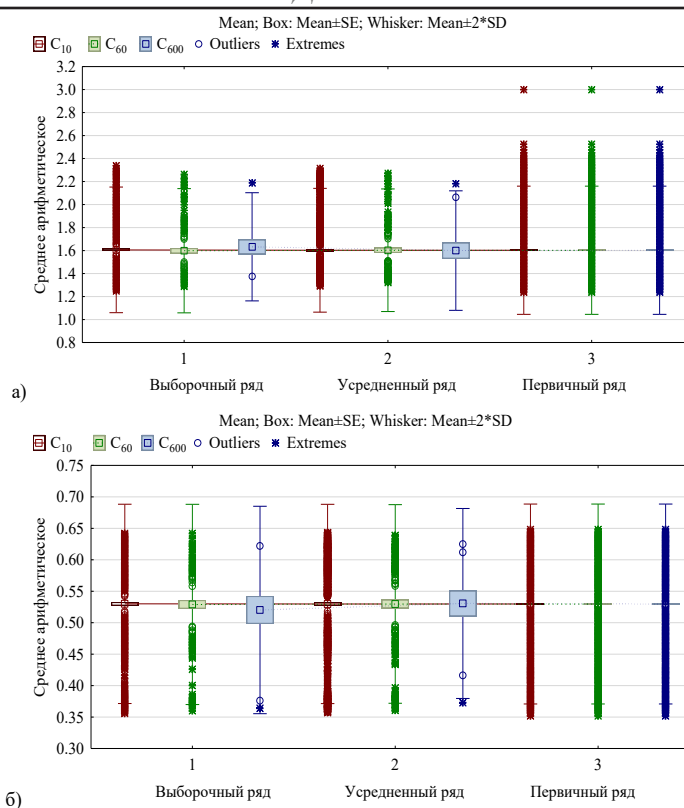


Рис. 5. Диаграмма размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса в г. Перми (mean – среднее арифметическое значение, SE – среднеквадратическая ошибка, SD – среднеквадратическое отклонение, Outliers – выбросы; Extremes – экстремумы)

Дисперсионный анализ с учетом совместного влияния масштаба усреднения и характера выборки на ежесекундные и 5-минутные колебания физических показателей качества воды (2 этап)

На втором этапе был проведен более подробный дисперсионный анализ при наличии совместного взаимодействия масштаба усреднения и характера выборки (выборочный, усредненный ряды) на ежесекундные и 5-минутные колебания мутности и электропроводности. Немаловажно, что на первом этапе влияние характера выборки и уровней времени продолжительности на характер колебаний мутности и электропроводности отсутствовало. При совместном учете характера выборки и уровней времени продолжительности результаты дисперсионного анализа выявили влияние применяемого типа выборки и ха-

рактера уровня масштаба усреднения на колебания показателей качества воды (рис. 6, табл. 6, где SS – вариабельность (сумма квадратов отклонений), MS – дисперсия, F – критерий Фишера, p – уровень значимости, df – степень свободы). Результаты дисперсионного анализа показали, что отсутствуют статистически значимые различия средних значений колебаний мутности и электропроводности для участков Камского водохранилища:

1. усредненных выборок в 10 минут (уровень времени продолжительности в 600 значений) и ежесекундных колебаний мутности и электропроводности в районе Чусовского плеса г. Перми;

2. усредненных и выборочных рядов в 1 и 1.5 минуты (уровень времени продолжительности в 60 и 90 значений) и ежесекундных колебаний мутности и электропроводности в районе г. Березники;

Статистические характеристики оценки различий средних значений на основе критерия Фишера F для всех подгрупп выборок мутности и электропроводности воды на примере Камского водохранилища

Название	df	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Чусовской плес г. Перми		$S_{в\bar{b} 10} + S_{с\bar{c} 10} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 60} + S_{с\bar{c} 60} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 600} + S_{с\bar{c} 600} + S_{слере}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	21.8	21.8	3471	0	21.9	21.9	3479	0	17.5	17.5	2770	0
Между группами	2	0.221	0.11	17.5	0	0.225	0.113	17.9	0	0.001	0.001	0.101	0.904
Внутри групп	8304	52.2	0.006			52.2	0.006			52.4	0.006		
Общая	8306	52.5				52.5				52.4			
Мутность													
Свободный член	1	129	129	1671	0	131	131	1697	0	163	163	2105	0
Между группами	2	1.784	0.892	11.516	0.00001	1.552	0.776	10.017	0.00005	0.013	0.006	0.082	0.922
Внутри групп	8304	643	0.078			643	0.078			645	0.078		
Общая	8306	645				645				645			
г. Березники (v=1/с)		$S_{в\bar{b} 30} + S_{с\bar{c} 30} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 60} + S_{с\bar{c} 60} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 90} + S_{с\bar{c} 90} + S_{слере}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	489	489	433	0	291	291	252	0	218	218	189	0
Между группами	2	51.9	25.9	23.0	0	4.815	2.408	2.084	0.125	0.008	0.0041	0.004	0.996
Внутри групп	1900	2146	1.1294			2195	1.155			2192	1.154		
Общая	1902	2198				2200				2192			
Мутность													
Свободный член	1	4078	4078	8248	0	3739	3739	7545	0	3653	3653	7354	0
Между группами	2	10.6	5.3	10.7	0.00002	0.58	0.29	0.586	0.557	0.033	0.017	0.033	0.967
Внутри групп	1900	939	0.494			941	0.495			944	0.497		
Общая	1902	950				942				944			
г. Березники (v=12/час)		$S_{в\bar{b} 3} + S_{с\bar{c} 3} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 10} + S_{с\bar{c} 10} + S_{слере}$				$S_{в\bar{b} 30} + S_{с\bar{c} 30} + S_{слере}$			
Электропроводность воды													
Свободный член	1	3.503	3.503	29759	0	3.447	3.447	28851	0	3.293	3.293	26353	0
Между группами	2	0.002	0.001	10.34	0.00005	0.001	0.001	5	0.007	0.00005	0.00002	0.2	0.823
Внутри групп	293	0.034	0.0001			0.035	0.0001			0.037	0.0001		
Общая	295	0.037				0.036				0.037			
Мутность													
Свободный член	1	1815	1815	4799	0	1807	1807	4781	0	1877	1877	4822	0
Между группами	2	1.086	0.543	1.436	0.239	1.392	0.696	1.841	0.16	0.165	0.082	0.212	0.809
Внутри групп	293	111	0.378			111	0.378			114	0.389		
Общая	295	112				112				114			

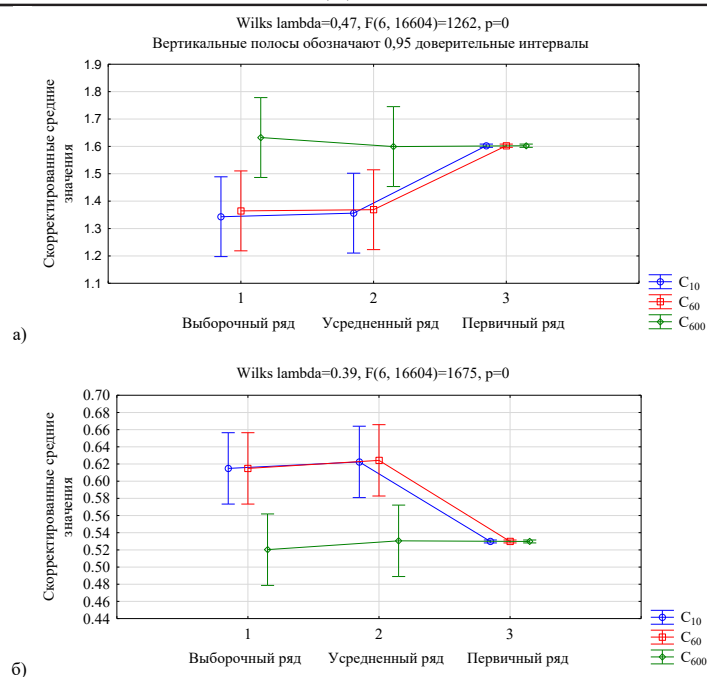


Рис. 6. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе Чусовского плеса в г. Перми ($v=1/c$)

3. усредненных и выборочных рядов в 2.5 часа (уровень времени продолжительности в 30 значений) и 5-минутных колебаний мутности и электропроводности в районе г. Березники.

При этом наблюдаемые оценочные предельные значения по оси ординат на диаграммах размаха мутности и электропроводности (рис. 6-8), полученные методом наименьших квадратов, являются скорректированными средними значениями зависимых переменных (выборочный, усредненный ряды) при различных комбинациях уровней независимых переменных (масштабов усреднения) (ковариаты) [18].

Как следует из диаграмм размаха, показана удовлетворительная стабильность средних значений ежесекундных выборок с усреднением в 10 минут в районе Чусовского плеса г. Перми (рис. 6); ежесекундных выборок с усреднением в 1.5 минуты (рис. 7) и выборки 5-минутных колебаний с масштабом усреднения в 2.5 часа (рис. 8) для участка Камского водохрани-

лища в районе г. Березники, на примере таких физических показателей качества воды, как электропроводность и мутность воды.

Данные показатели имеют хорошие линейные связи с химическими показателями: электропроводность с макрокомпонентами, в первую очередь, с хлоридами, и соответственно, минерализацией, а мутность со взвешенными веществами.

Показано, что частота отбора проб и продолжительность забора воды с использованием интегрального метода отбора проб оказывает значительное влияние на объективность, корректность оценки состояния водного объекта.

Принципиальную важность имеет не только частота отбора проб воды, но и масштаб усреднения, т.е. время (продолжительность) забора воды. Так как информация, с какой продолжительностью необходимо проводить забор воды, отсутствует в действующих нормативных документах [17], то возникает необходимость ее учета при выборе оптимальной системы отбора

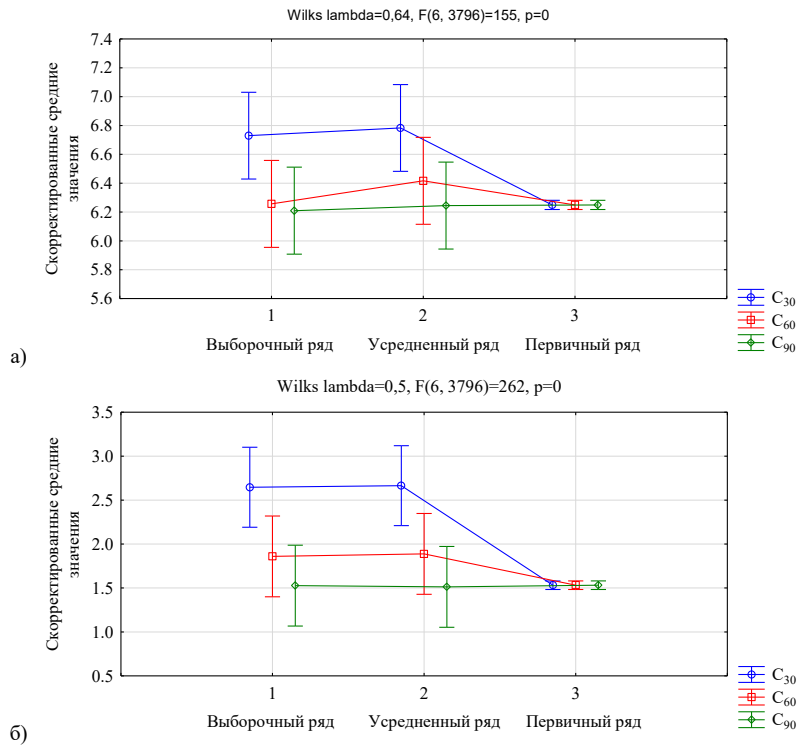


Рис. 7. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе г. Березники ($\nu=1/c$)

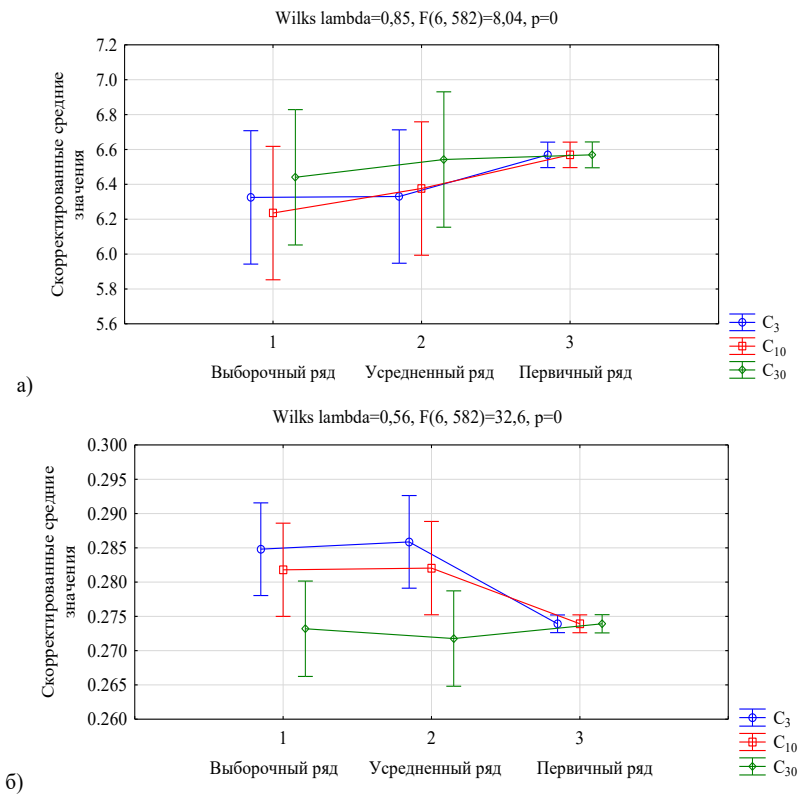


Рис. 8. Диаграммы размаха мутности (а) и электропроводности (б) между выборками для Камского водохранилища в районе г. Березники ($\nu=12/\text{час}$)

проб (традиционная, интегральная или пассивная [4-12]). Выбор системы помогает обеспечить получение и стабильность продолжительности забора воды и частоты отбора проб воды репрезентативного ряда натуральных наблюдений, что является залогом получения правильных результатов анализа.

Заключение

В работе рассмотрены основные принципы применения как параметрического метода – однофакторного дисперсионного анализа – для сравнения средних арифметических значений, так и непараметрического метода, если условия нормальности распределения не соблюдаются, – критерия Краскела-Уоллиса для ежесекундных и 5-минутных колебаний значений мутности и электропроводности воды на примере двух участков Камского водохранилища.

Показано, что выборки с различными вариантами группировки по средним значениям и выборкой каждого n -значения статистически незначимы, и эти факторы не влияют на результаты средних значений выборок, кроме выборок, взятых с 10-минутным усреднением из первичного ряда ежесекундных наблюдений, как для мутности, так и для электропроводности в районе ЧОС, также 5-минутных выборок с 2.5-часовым усреднением и ежесекундных выборок с усреднением в 1.5 минуты для Камского водохранилища в районе г. Березники.

Можно сделать вывод о необходимости отбора проб воды интегральным методом с временным масштабом усреднения в 10 минут для Камского водохранилища в районе ЧОС и усреднением в 1.5 мин в районе г. Березники для ежесекундных колебаний мутности и электропроводности воды.

Поэтому принципиально важно использовать оценки особенностей форми-

рования турбулентных и когерентных структур водных масс для учета внутрисуточных колебаний показателей качества воды и проводить натурные полевые исследования в этом районе с существенно большей частотой измерения, чем 1 раз в сутки, на основе современных методов измерения. Представляется целесообразным использовать вместо традиционного мониторинга с отбором проб воды батометром с усреднением около 20 секунд интегральный метод отбора проб воды, когда продолжительность забора воды батометром достигает 10 минут с последующим усреднением. Хотя этот метод является более трудоемким, однако позволяет, в отличие от точечного отбора, значительно снизить влияние случайных флуктуаций в содержании показателей качества воды и иметь более стабильные и репрезентативные результаты, вследствие учета и анализа усредненных за достаточно продолжительные отрезки времени, а не только мгновенных значений в конкретный момент, при этом также могут быть выявлены кратковременные потоки, которые могут быть пропущены при разовом отборе.

Представляется необходимым учитывать, что масштабы временного усреднения могут существенно варьировать в зависимости от особенностей гидродинамики водных объектов. При этом в рекомендациях Р 52.24.353 – 2012 «Отбор проб поверхностных вод суши» [17] нет информации о масштабах усреднения (продолжительности забора воды), присутствует только обобщенная информация о частоте отбора проб.

В настоящее время определение контролируемых показателей качества воды с такой частотой возможно только при использовании автоматических систем, основанных на физических методах их определения, только для удельной электропроводности и мутности воды, кото-

рые хорошо связаны с большинством лимитирующих показателей качества воды. Поэтому, возможно, полученные выводы для рассматриваемых показателей могут быть перенесены на показатели качества воды, определяемые химическим методом. Таким образом, эффективная систе-

ма мониторинга должна быть комбинированной, включать в себя как традиционные методы определения химических ингредиентов с частотой 1/мес, так и современные методы измерения физических показателей качества воды со значительно большей частотой.

Библиографический список

1. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Возняк А.А., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С.* Особенности регулирования качества воды при ее селективном заборе из водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 56-68.
2. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В., Онутин М.А., Синцова Т.Н.* Особенности внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище // Географический вестник. 2024. №3 (70). С. 70-82.
3. *Синцова Т.Н., Онутин М.А.* Внутрисуточные колебания качества воды Камского водохранилища // Успехи современного естествознания. 2024. №8. С. 30-35.
4. *Torres C., Gitau M.W., Paredes-Cuervo D.* et al. Evaluation of sampling frequency impact on the accuracy of water quality status as determined considering different water quality monitoring objectives // Environ Monit Assess. 194, 489. 2022.
5. *Hayes E.K. and Gagnon G.A.* From capture to detection: A critical review of passive sampling techniques for pathogen surveillance in water and wastewater // Water Research 261. 2024. 122024. P. 1-14.
6. *da Luz N., Tobiasson J.E., Kumpel E.* Water quality monitoring with purpose: Using a novel framework and leveraging long-term data // Science of the Total Environment 818. 2022. 151729. P. 1-12.
7. *de Almeida R.G.B., Lamparelli M.C., Dodds W.K.* et al. Sampling frequency optimization of the water quality monitoring network in São Paulo State (Brazil) towards adaptive monitoring in a developing country // Environ Sci Pollut Res 30, 111113–111136. 2023.
8. *Thompson J., Pelc C.E., Jordan T.E.* Water quality sampling methods may bias evaluations of watershed management practices // Science of the Total Environment 765 (2021) 142739. P. 1-8.
9. *Babitsch D., Berger E., Sundermann A.* Linking environmental with biological data: Low sampling frequencies of chemical pollutants and nutrients in rivers reduce the reliability of model results // Science of the Total Environment, 772, 145498. 2021. P. 1-23.
10. USGS. Next generation water observing system: Delaware river basin // U.S. Geological Survey. 2021.
11. *Haskell, B.R., Dhiyebi, H.A., Srikanthan, N., Bragg, L.M., Parker, W.J., Giesy, J.P., et al., 2024.* Implementing an adaptive, two-tiered SARS-CoV-2 wastewater surveillance program on a university campus using passive sampling. Sci. Total Environ. 912, 168998. 2024.
12. *Law I.* Application of passive sampling for the monitoring of microbiological contaminants in aquatic systems. Fulfilment for the degree of master of science in pathobiology. 2024.
13. Интернет-адрес Valeport MIDAS ECM <https://www.valeport-co-uk>
14. *Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A.* Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol. 2014. V.508. P.328-342.
15. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. 816 с.
16. Statistica компании StatSoft [StatSoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru>].
17. Р 52.24.353–2012 Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ростов-на-Дону. Росгидромет. ФГБУ «ГХИ», 2012. 40 с.
18. *Keppel, G.* Design and analysis: A researcher's handbook (3rd ed.). Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc. 1991.

**STATISTICAL ASPECTS OF DAILY FLUCTUATIONS OF WATER QUALITY INDICATORS
(ON THE EXAMPLE OF THE KAMA RESERVOIR)**

Sintsova T.N.¹, Lepikhin A.P.¹, Rozental O.M.², Levin L.Y.¹, Bogomolov A.V.¹

¹*Mining Institute UB RAS*

²*Institute of Water Problems RAS*

For citation:

Sintsova T.N., Lepikhin A.P., Rozental O.M., Levin L.Y., Bogomolov A.V. Statistical aspects of daily fluctuations of water quality indicators (on the example of the Kama reservoir) // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 17–35. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.2>

Water bodies located in zones of active technogenesis are characterized by significant time variability of hydrochemical indicators of water quality. When conducting traditional monitoring of water bodies with water sampling using standard bathometers, the values of monitored water quality indicators are determined, as a rule, with a characteristic time averaging of ~10 seconds. The problem arises, however, as to how do these indicators relate to their average daily values? What should be the minimum averaging period in order to obtain objective average daily values of the considered water quality indicators? The paper considers the application of the analysis of variance to study every-second and five-minute observations of water conductivity and turbidity for two sections of the Kama Reservoir: the Chusovskoy Ples area of Perm and the Berezniki area. It has been demonstrated that water quality monitoring in the Perm area of the Kama Reservoir should be based on the evaluation of integral sampling methods with a time averaging scale of at least 10 minutes. At the same time, with regard to the Kama reservoir near Berezniki, the need for integrated sampling with averaging of at least 1.5 minutes is confirmed.

Keywords: analysis of variance, arithmetic mean, variance, Kama reservoir.

Сведения об авторах

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер лаборатории проблем гидрологии суши, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: lepin49@mail.ru

Левин Лев Юрьевич, доктор технических наук, чл.-корр. РАН, директор «ГИ УрО РАН»; e-mail: aerolog_lev@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: whitewing85@mail.ru

Розенталь Олег Моисеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории управления водными ресурсами, Институт водных проблем РАН («ИВП РАН»), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: omro3@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 10.10.2025