Научная статья / Scientific paper
УДК: 556
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.286

Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом

Т.Н. Синцова*, А.П. Лепихин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия
e-mail: *tanya_sinzova@mail.ru

Аннотация. Целью исследования является оценка погрешностей измерения расходов воды в водотоках химическим методом. Выявлено, что неустойчивость в измерениях расходов воды при залповом и постоянном сбросах концентрации маркера связана с несостоятельностью оценок среднеарифметических значений, так как их функции распределения описываются обратным нормальным распределением и обусловлена структурой используемых расчетных зависимостей, при этом колебания расходов воды описываются обратным нормальным распределением, для которого оценки средних значений и дисперсий несостоятельны. Соотношение по оценке расходов воды содержит в знаменателе значения концентрации маркера, представляющие собой, в общем случае, случайную величину. Если ее изменчивость определяется только погрешностями измерений и мелкомасштабными турбулентными пульсациями, то колебания концентрации маркера будут описываться нормальным распределением, а расчетная величина расходов воды должна описываться обратным нормальным распределением.

В результате математического моделирования погрешностей измерений расходов воды по схеме Монте–Карло рассчитано, что при низкой изменчивости концентрации маркера их оценки состоятельны. Выявлено, что при низкой изменчивости концентрации маркера CvC < 0,1 их оценки состоятельны, а при CvC > 0,25 – неустойчивы. Горные реки, на которые в первую очередь ориентируются рассматриваемые методы оценки расходов воды, характеризуются как высокой турбулентностью, так и быстрой временной изменчивостью расходов воды. Поэтому расстояние от места ввода маркеров до контрольного створа должно обеспечивать достаточно равномерное и полное смешение маркера по поперечному сечению потока, при этом характерное время отслеживания изменения концентраций в контрольном створе при мгновенном введении маркера должно быть много меньше характерной временной изменчивости самого расхода воды.

Предложены эффективные способы для повышения устойчивости измерений расходов воды, уменьшения колебаний измеряемых концентраций в контрольном створе: увеличение расстояния от начального до контрольного створов, использование гирлянд из датчиков.

Ключевые слова: метод смешения; функция распределения; несостоятельность; расход воды.
Для цитирования: Синцова Т.Н., Лепихин А.П. Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 286–295. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.286.

Statistical Aspects of the Assessment Water Discharge Using the Tracer Dilution Method

Tatyana N. Sintsova*, Anatoly P. Lepikhin
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
e-mail: *tanya_sinzova@mail.ru

Abstract. The aim of this study is to assess the errors in measuring water discharge in streams using the dilution method. Instability in water discharge measurements during instantaneous and continuous tracer injections arises from the inconsistency of arithmetic mean estimators. This occurs because the distribution functions follow an inverse normal distribution, which results from the structure of the calculation formulas. Furthermore, discharge fluctuations follow an inverse normal distribution, for which estimates of mean values and variances are inconsistent. The ratio for estimating water flow contains tracer concentrations in the denominator, which are generally random variables. If its variability is determined solely by measurement errors and small-scale turbulent

fluctuations, then the tracer concentrations fluctuations will be normally distributed, and the calculated discharge will follow an inverse normal distribution.

Mathematical modeling of water flow measurement errors using a Monte Carlo simulation showed that, with low marker concentration variability, their estimates are consistent. It was found that, at low tracer concentration variability (CvC < 0.1), their estimates are stable, while at CvC > 0.25, they are unstable. Mountain rivers, which are primarily targeted by the considered methods for estimating water discharge, are characterized by both high turbulence and rapid temporal variability in water discharge. Therefore, the distance from the tracer injection site to the control section should ensure sufficiently uniform and complete mixing of the marker across the flow cross-section. Furthermore, the characteristic time for tracking changes in concentrations at the control section with instantaneous tracers' injection should be significantly shorter than the characteristic temporal variability of the water discharge itself.

Effective methods for improving the stability of water discharge measurements and reducing fluctuations in measured concentrations at the control section are proposed: increasing the distance between the injection and control section, and using sensor arrays.

Keywords: mixing method; distribution function; inconsistency; water discharge.

For citation: Sintsova T.N., Lepikhin A.P. Statistical Aspects of the Assessment Water Discharge Using the Tracer Dilution Method. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 286–295. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.286. (In Russian; abstract in English).

Введение

При решении практических задач достаточно часто возникает необходимость оценки расходов воды в водотоках, поперечное сечение русел которых имеет сложную геометрическую форму. Использование традиционных методов измерений[1][2], построенных на оценке средней скорости течения и площади поперечного сечения, вызывает значительные сложности. Если поток имеет простую геометрическую форму и распределение скорости потока описывается достаточно гладкой функцией, то оценка расхода воды не представляет каких-либо проблем. В прямоугольном линейном канале достаточно часто применяются упрощенные способы измерений скорости потока, иногда даже с использованием всего одной промерной точки[2]. Чем сложнее геометрия поперечного сечения русла, тем большее количество точек измерения скорости потока требуется использовать[1]. Однако даже в установившихся потоках часто возникают технические сложности при измерении скорости потока более многоточечным способом.

Наиболее простой и очевидный подход к решению данной проблемы – совершенствование системы измерения скорости течения воды. Сейчас наибольшее распространение получила система измерения, построенная на совмещении эхолотов с доплеровскими акустическими измерителями скорости потока[3]. Однако при этом методе измерения остается проблема дискретности измерения глубины и ширины. Для горных рек с очень сложным поперечным сечением данные методы измерения могут давать неприемлемо высокую погрешность, поэтому для водных объектов с очень сложной морфометрией необходимо применение принципиально других подходов, не связанных с пространственно-временной дискретностью измерений.

Для решения этих задач рекомендуется использовать химический метод, который не требует задания скорости течения и площади поперечного сечения. В настоящее время современное название химического метода –

[1] Методические указания. ГСИ. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость - площадь». МИ 1759-87. Изд. стандартов. М. 1987. 25 с.

[2] СТО 4.2-3-2015 Мелиоративные системы и сооружения. Открытые каналы. Правила определения расхода воды с использованием метода одноточечного измерения скорости потока. Новочеркасск. РосНИИПМ. 2015. 36 с.

[3] РД 52.08.767-2012 Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами "Stream Pro" и "Rio Grande" / Министерство природных ресурсов и экологии РФ; Росгидромет. С.-П.: Нестор-История. 2012.

методы ионного паводка и постоянного пуска солевого раствора[4], при этом они не оказывают негативного воздействия на водные объекты, что подтверждается исследованиями на основе комплексного воздействия соляных пусков на окружающую среду [1], водную растительность [2] и микроорганизмы [3]. Химический метод используется в качестве метода внедрения объема индикатора в исследуемый водный поток для прогностического расчета концентраций загрязняющих веществ при имитации аварийного сброса сточных вод, залпового сброса при транспортной аварии[5]. Хотя сам химический метод известен уже более 150 лет [4–6], а его практическая реализация не требует значительной технической оснащенности, однако его широкое практическое использование в настоящее время существенно сдерживается нестабильностью результатов измерений, что подтверждается работами [7–9]. Оценка корректности измерения расходов воды в реках химическим методом в общем случае включает в себя следующие три взаимосвязанных аспекта: технологический, гидравлический и статистический.

В настоящее время основное внимание уделяется только первым двум аспектам. При этом технологический аспект включает в себя комплекс работ по введению маркера в водоток и его эффективную регистрацию в фоновом и контрольном створах. Гидравлический аспект направлен на обеспечение максимального полного перемешивания маркера с водой водотока на участке от фонового до контрольного створа. В то же время в объяснении существенной нестабильности результатов измерений расходов воды этим способом статистические аспекты должны играть принципиальную роль. Использование методов статистического анализа при решении прикладных задач, как правило, априорно основано на допущении, что статистические оценки рассматриваемых переменных состоятельны, т.е. дисперсии их оценок при неограниченном увеличении объема выборки стремятся к нулю. Существенную роль эти эффекты играют при определении расходов воды химическим методом (методом смешения), описывающихся обратным нормальным распределением, для которого несостоятельны оценки средних значений, дисперсий и более высоких моментов согласно [10–11], при наличии случайного процесса в знаменателе расчетных соотношений, в данном случае концентрации маркера (вещества). Целью исследования является оценка корректности измерения расходов воды в реках химическим методом при их залповом и постоянном сбросах.

Материалы и методы исследования

В работе используется основное положение, что колебания расходов воды $Q(t)$ нельзя рассматривать как нормально распределенную величину, они должны описываться обратным нормальным распределением, для которого не существует первого, второго и более высоких моментов:

$$\langle Q \rangle = \overline{Q} = \left\langle \frac{G}{C_k} \right\rangle \neq \frac{G}{\langle C_k \rangle}, \qquad (1)$$

соответственно,

$$\left\langle \frac{G}{T_N \sum_i^N C_{ki}} \right\rangle \neq \frac{G}{T_N \left\langle \sum_i^N C_{ki} \right\rangle}, \qquad (2)$$

где T_N – продолжительность измерений концентраций; $\langle\ \rangle$ – обозначение среднего значения; $C_к$ – концентрация маркера в контрольном створе, мг/л; G – интенсивность поступления концентрации маркера, кг/с.

Как показано [10–11] характерной особенностью обратных нормальных распределений является то, что даже оценки средних арифметических значений, описываемые данной функцией распределения, являются несостоятельными, т. е. их дисперсия не

[4] Рекомендации Р 52.08.930-2023 Измерение расхода воды методами ионного паводка и постоянного пуска солевого раствора. ФГБУ «ГГИ». С.-П. 2023. 84 с.

[5] Рекомендации Р 52.24.627-2007 Усовершенствованные методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод с учетом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ. Росгидромет. ГУ ГХИ. Ростов-на-Дону. 2007. 168 с.

уменьшается с увеличением измерений. Это очень серьезное фундаментальное ограничение повышения надежности измерений расходов воды при использовании данной схемы, оно объясняет наблюдаемую нестабильность в измерениях расходов воды.

Результатами моделирования являются значения относительной среднеквадратической погрешности измерения расходов воды химическим методом при постоянном (метод постоянного пуска солевого раствора) и залповом (метод ионного паводка) сбросах маркера в водоток. Объектом исследования являются смоделированные ряды наблюдений концентраций маркера в контрольном створе по схеме Монте-Карло при объеме выборок N~10^5 для различных значений коэффициентов вариации в диапазоне 0,1–0,9.

Оценка расходов воды химическим методом, при постоянном введении маркера в водоток, основывается на следующем балансовом соотношении:

$$q_{сб} \cdot C_{сб} + Q \cdot C_{ф} = (Q + q_{сб}) \cdot C_{к}, \quad (3)$$

где $q_{сб}$ – расход жидкости, используемой при введении маркера в водоток, м^3/с; $C_{сб}$ – исходная концентрация маркера, мг/л; Q· – расход воды рассматриваемого водотока, м^3/с; $C_{ф}$ – фоновая концентрация маркера в водотоке, мг/л.

При выполнении неравенства

$$\frac{q}{Q} << 1, \frac{C_{ф}}{C_{к}} << 1, \quad (4)$$

расход воды при постоянном сбросе маркера в водоток (при постоянном пуске солевого раствора) согласно (3) имеет вид

$$Q \approx \frac{q_{сб} \cdot C_{сб}}{C_{к}}. \quad (5)$$

Если (4) не выполняется с требуемой надежностью, то расход воды определяется

$$Q \approx \frac{q_{сб} \cdot (C_{сб} - C_{к})}{(C_{к} - C_{ф})}. \quad (6)$$

При залповом сбросе маркера в водоток (при использовании метода ионного паводка) расход воды находится как

$$Q(t) \approx \frac{G}{\sum \Delta t_i C_{кi}(t)}, \quad (7)$$

где $C_{кi}$ – измеряемые значения i концентрации маркера в контрольном створе за интервал времени Δt_i, кг/м^3.

При этом нетрудно видеть, что находящаяся в знаменателе величина $\sum_i^N C_{ki}$ является случайной. Если колебания C_{ki} определяются только стандартной ошибкой измерения, то их величина должна иметь нормальное распределение, а сами оценки робастными. В этом случае наилучшей оценкой определяющего параметра является среднее арифметическое значение, имеющей при данном объеме выборки минимальную погрешность.

Надежность выполнения данных соотношений (5)–(7) определяется эффективностью полного перемешивания маркера в водотоке. Интересно отметить, что первый вариант кандидатской диссертации А.В. Караушева, подготовленный еще в довоенный период под руководством В.М. Маккавеева, был посвящен оценке процессов разбавления для решения задач реализации химического метода измерения расходов воды. Так как, как правило, в естественных водотоках $H << B$ (H – глубина, B – ширина водотока), то определяющим фактором является интенсивность процессов поперечной дисперсии. Если коэффициенты турбулентной диффузии в водотоках, хотя бы в первом приближении, могут рассматриваться как изотропные, то коэффициенты поперечной, обусловленные Тейлоровской диффузией, могут существенно различаться. Данное положение подтверждается многочисленными натурными оценками, их анализ дается в [10, 12–13]. При этом на характер поперечного перемешивания существенное влияние может оказывать также формирование в водотоке течений второго рода по Прандтлю, а также возможных стратификационных эффектов.

В современной литературе очень широко обсуждаются наблюдаемые эффекты неперемешивания сливающихся рек на протяжении не только десятков, но и сотен километров [14–17]. Следовательно, имеющиеся

многочисленные оценки параметризации коэффициентов поперечной диффузии могут использоваться только в качестве начальных предварительных оценок. Поэтому, на наш взгляд, фиксируемая неустойчивость измерений расходов воды данным химическим методом, по-видимому, связана с корректностью установления створа полного перемешивания вне зависимости от схемы измерений.

Постановка задачи

Согласно многочисленным натурным исследованиям в горных потоках [12, 13], в простейшем случае, колебания концентраций показателей качества воды в водотоке описываются нормальным распределением, поэтому колебания концентрации маркера, вводимого в водоток при использовании метода смешения, удобно записать в виде:

$$C(t) = \overline{C_0}\left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right), \qquad (8)$$

где ε(t) – случайный процесс, имеющий нормальное распределение с параметрами (0, 1).

Средние значения измеряемых расходов воды согласно (8) при постоянном $Q_n(t)$ и залповом $Q_з(t)$ введении маркера в водоток определяются:

$$Q_n(t) = \frac{G_1}{\overline{C_0}\left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right)}, \qquad (9)$$

$$Q_з(t) = \frac{G_2}{n \cdot \Delta T \cdot \overline{C_0} \cdot \left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right)}, \qquad (10)$$

где G_1, G_2 – интенсивность поступления концентрации маркера, соответственно, при постоянном и залповом сбросах.

При этом возникает проблема установления оптимального количества замеров. С одной стороны, казалось бы, чем чаще проводить замеры, чем меньше будет промежуток времени между отдельными замерами, тем с большей надежностью может обеспечиваться соблюдение балансовых соотношений (9), (10), с другой стороны, каждое измерение производится с определенной погрешностью замеров. В оценке погрешности измерения по схемам постоянного ввода маркера и мгновенного сброса имеется принципиальная разница. При первой схеме измерения возможно обеспечить проведение независимых, многочисленных измерений с погрешностью метода $\sigma_S \sim \frac{\sigma_{из}}{\sqrt{N}}$. В то же время при второй схеме происходит суммация, при интегральной оценке погрешность расчетов при их нормальном распределении должна возрастать как $\sigma_S \sim \sigma_{из}\sqrt{N}$, где N – общее количество замеров. Минимальное количество замеров, которое в принципе возможно при данной схеме проведения замеров – три. Первый замер в момент времени t_1 проводится при $C_1 \geq 0$, второй замер в момент времени t_2 при max C_2, третий замер в момент времени t_3 при $C_3 \geq 0$, однако проблема в том, как угадать, как определить эти моменты времени? В условиях недостаточности гидрологической информации проводить такие оценки совершенно невозможно.

Если расчетные значения расходов воды линейно связаны с концентрацией маркера, описываемой нормальным распределением, то среднеквадратическая погрешность определения расхода воды при постоянном сбросе определяется как $\sigma_n = \sigma_{nc}/\sqrt{N}$, а при залповом сбросе как $\sigma_з = \sigma_{зс}\sqrt{N_з}/\sqrt{N}$, где N, $N_з$ – количество замеров концентрации маркера, соответственно, при выполнении параллельно проведенных замеров и одной серии параллельных измерений; σ_{nc}, $\sigma_{зс}$ – среднеквадратическая погрешность измерений концентрации маркера, соответственно, при постоянном, залповом сбросах.

Решение задачи и анализ полученных результатов

Для оценки среднеквадратической погрешности измерения расходов воды на основе соотношений (8)-(10) выполнено моделирование по схеме Монте-Карло при объеме выборки $N \sim 10^5$ при различных коэффициентах вариации концентрации маркера Cv_C (таблица 1).

Как следует из Табл. 1, если коэффициенты вариации концентрации маркера Cv_C меньше 0,2, то используемый химический метод является устойчивым для измерения расходов воды как для постоянного, так и залпового сбросов.

Вне зависимости от применения конкретной схемы измерения с постоянным или

мгновенным введением маркеров в водоток основными факторами формирования погрешностей измерения являются:

1. абсолютные и соответствующие им относительные погрешности измерения концентрации маркера в воде водного объекта σ_i, мг/л;

2. погрешности, связанные с равномерным распределением маркера по поперечному сечению водотока;

3. погрешность обеспечения равномерного введения маркера в водоток;

4. погрешность, связанная с конечной скоростью введения маркера в водоток.

Таблица 1. Результаты оценки среднеквадратических погрешностей измеренных расходов при различных коэффициентах вариации концентрации маркера, полученных в ходе численного моделирования

Table 1. Results of Assessing Root-Mean-Square Errors of Measured Discharge at Various Coefficients of Variation of Tracer Concentration Obtained from Numerical Modeling

Коэффициент вариации концентрации маркера, Cv_C	Относительная среднеквадратическая погрешность измерения расходов воды	
	при постоянном сбросе, $\sigma_п$	при залповом сбросе, $\sigma_з$
0,10	0,11	0,33
0,15	0,17	0,53
0,20	0,23	0,78
0,25	0,36	1,30
0,30	0,54	5,79
0,90	29,2	714

Если первый и второй факторы являются определяющими при обоих способах измерений, то третий фактор является определяющим для способа измерения с постоянным вводом в водоток маркера, а четвертый играет существенную роль при залповом введении маркера.

Для обеспечения оперативности проведения измерений используются не прямые, химические методы, а косвенные, основанные на оценке физических свойств воды в первую очередь удельной электропроводности воды или ее оптической плотности.

Современные методы измерений обеспечивают погрешность измерения ~ 1 %, однако при этом возникает проблема установления и обеспечения надежности, устойчивости связи между самим маркером и несвязанными с его содержанием изменениями физических свойств воды, при этом принципиально важно, чтобы эта связь была надежной и устойчивой в очень широком диапазоне измерений концентраций.

При проведении измерений происходит пространственно-временное осреднение измеряемого показателя в масштабе $L_{из} \cdot T_{из}$. Если определение концентрации связано с отбором проб воды, то $L_{из}$ следует рассматривать как характерные размеры пробоотборника, а $T_{из}$ – продолжительность забора пробы воды. Если используются системы косвенных измерений, то l_d – характерные размеры самого датчика (его рабочего органа), $T_{из}$ – время измерения.

Из-за вихревой структуры турбулентности измеряемые показатели являются в общем случае случайной величиной. При этом возникает принципиальная задача: найти, выявить, оценить допустимый уровень различия, связанный со структурой турбулентности в неравномерности распределения показателей по сечению потока.

Для обеспечения однородности, т.е. максимального снижения колебаний показателей приборов контроля необходимо, чтобы ключевую роль в перемешивании играли вихри с характерными размерами l меньше размеров датчика l_d. В этом случае в силу центральной предельной теоремы интенсивность пульсаций будет стремиться к нулю $\sigma^2 \rightarrow 0$ при $l \rightarrow 0$, при этом характерный период пульсаций T будет

определяться как $T \sim l / V_*$, где V_* – динамическая скорость [18].

Нетрудно видеть, если рассматриваемый линейный размер вихрей l меньше размера датчика l_d, то в этом случае эффективный коэффициент диффузии $K_{\text{турб}}$ для такого размера вихрей должен быть $K_{\text{турб}} \sim V_* \; l_d$. Так как ширина зоны перемешивания при диффузном режиме $L \sim (K_{\text{турб}} \; t)^{1/2}$, t – время «добегания» от источника поступления маркера в водоток до контрольного створа, где производятся измерения. Максимальная ширина зоны смешения L для обеспечения полного перемешивания должна быть не меньше ширины потока B, т. е. $L \sim B$, соответственно, имеем

$$L \sim \frac{B^2 V}{K_{\text{турб}}} \sim \frac{B^2 V}{V_* l_d}, \qquad (11)$$

так как $\frac{V}{V_*} \sim \frac{C}{\sqrt{g}}$, то $L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d}$, где C – коэффициент Шези, V – средняя характерная скорость потока на рассматриваемом участке.

При использовании гирлянды из датчиков N_d максимальная ширина зоны смешения L для обеспечения полного перемешивания определяется как:

$$L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d \sqrt{N_d}}. \qquad (12)$$

Линейные размеры зоны распространения маркера в диффузионном приближении характеризуются следующими параметрами по глубине потока $L_H = (K_{zz} \cdot t)^{1/2}$, по ширине потока $L_B = (K_{yy} \cdot t)^{1/2}$, вдоль потока $L_X = V\, t + (K_{xx} \cdot t)^{1/2}$, где K_{zz}, K_{yy}, K_{xx} – коэффициенты диффузии по глубине, ширине потока и продольной диффузии, соответственно. Принимая, что $t \sim L_X / V$, где L_X – расстояние от источника поступления маркера в поток до контрольного створа, нетрудно оценить расстояние до створа эффективного перемешивания по глубине потока

$$L_{XH} >> H^2 \cdot V / K_{zz}, \qquad (13)$$

соответственно, по ширине потока

$$L_{XB} >> B^2 \cdot V / K_{yy}. \qquad (14)$$

Согласно большинству прикладных моделей турбулентности в русловых потоках

$$K_{zz} \sim P_{zz} \cdot V \cdot H, \qquad (15)$$

$$K_{yy} \sim P_{yy} \cdot V \cdot H, \qquad (16)$$

Подставляя (15), (16) в (13) и (14), соответственно, будем иметь

$$L_{XH} >> \text{H} / P_{zz},, \qquad (17)$$

$$L_{XB} >> B / P_{yy}, \qquad (18)$$

контрольный створ соответственно должен располагаться на расстоянии $L_{\text{конт}} \geq L_{XB} \geq L_{HB}$. При этом начало измерения концентрации маркера должно проводиться не раньше, чем $T >> (K_{xx} \; L_X/V)^{1/2}/V$ от начала пуска маркера.

Данная схема измерения расходов воды основана на использовании минимального объема априорной информации о гидродинамике потока и соблюдении неравенств (13), (14), однако она требует наличия соответствующего оборудования по обеспечению длительного, равномерного поступления маркера в водоток.

В то же время горные реки, для которых рассматриваемый метод может представлять наибольший интерес, характеризуются весьма быстрым прохождением паводка, значительной изменчивостью расходов воды. Поэтому на наш взгляд, фиксируемая неустойчивость измерений расходов воды данным химическим методом, по-видимому, в первую очередь связана с корректностью установления створа полного перемешивания вне зависимости от схемы измерений.

Как следует из многочисленных экспериментальных оценок, коэффициент поперечной дисперсии в 3–3,5 раза больше, чем коэффициент вертикальной дисперсии. Поэтому в широких руслах при отношении $B/H >$ 20 лимитирующим фактором, определяющим расстояние до створа полного перемешивания, будет поперечная дисперсия.

Принципиально другая ситуация может наблюдаться в водотоке со значительной вертикальной стратификацией водных масс. Однако для таких объектов измерение расходов воды методом разбавления, химическим методом не производится.

Когда из элементарных оценок интенсивности диффузионного перемешивания следует, что $L \sim (K_{zz} \cdot t)^{1/2}$ или $B \sim (K_{zz} \cdot L/V)^{1/2}$ отсюда

$$L \sim B^2 \cdot V / K_{zz}. \qquad (19)$$

При этом величина коэффициента поперечной диффузии, согласно многочисленным эмпирическим и полуэмпирическим оценкам, имеет вид

$$K_{zz} \sim P_{zz}\, H\, V\sqrt{g}/C. \qquad (20)$$

При этом величина коэффициента P_{zz} зависит как от соотношения $\sqrt{g}/C$, так и морфометрического показателя B/H. Согласно большинству оценок при $B/H \sim 20$ $P_{zz} \sim 0.25$ [19]. При $B/H \sim 100$ диапазон возможных колебаний данного параметра существенно увеличивается и составляет $P_{zz} \sim 0.2\text{-}3.1$. Подставляя (20) в (19) для оценки расстояния до створа полного перемешивания имеем $L_{Kzz} \sim B^2/(H\, P_{zz}\cdot\sqrt{g}/C)$. При $\sqrt{g}/C \sim 0.1$, $B/H \sim 20$, $H \sim 1$ имеем $L_{Kzz} \sim B^2/(1\cdot 0.25\cdot 0.1) \sim 40\cdot B^2$.

Согласно известному соотношению Римана расстояние до створа полного перемешивания $L_{Рим} \sim 0.13\cdot B^2\cdot C\cdot(0.7\cdot C+2\cdot\sqrt{g})$. При $C\sim 30$ имеем $L_{Рим} \sim B^2\cdot 0.13\cdot 30\cdot(0.7\cdot 30+6) = 105\cdot B^2$. В то же время при $C \sim 20$ различие этих оценок будет значительно меньше $L_{Kzz} \sim 60\cdot B^2$, $L_{Рим} \sim B^2\cdot 0.13\cdot 20\cdot(14+6) = 52\cdot B^2$. Таким образом для относительно небольших рек характерное расстояние до створа полного перемешивания должно гарантировано составлять $L \sim 50\cdot B^2$, т.е. при $B\sim 10$ м, $L\sim$ 5000 м, а при $B\sim 5$ м, соответственно, $L \sim 1250$ м.

Дополнительным источником формирования погрешности расчетов при постоянном введении маркеров в водоток является проведение измерений при невыполнении неравенства $T >> (K_{xx}\, L_X/V)^{1/2}/V$. Поэтому необходимо выполнение основных требований к выбору вещества, используемого в качестве маркера:

- оно не должно быть токсичным даже в малых концентрациях;

- должны существовать, быть доступными методы измерения, позволяющие определять малые концентрации с погрешностями приемлемыми для измерения расходов;

- вещество должно быть консервативно, по крайней мере его коэффициент неконсервативности k должен обеспечивать выполнение следующего неравенства $k * \frac{L}{V} \ll \acute{\varepsilon}$, где $\acute{\varepsilon}$ – приемлемая погрешность измерения расходов воды, а также гидродинамически пассивная, т.е. не оказывающая какого-либо влияния на гидродинамику потока.

Выводы

Состоятельность статистических оценок измерения расходов воды в водотоках химическим методом обусловлена структурой расчетных соотношений. Соотношение по оценке расходов воды содержит в знаменателе значения концентрации маркера, представляющие собой, в общем случае, случайную величину. Если ее изменчивость определяется только погрешностями измерений и мелкомасштабными турбулентными пульсациями, то колебания концентрации маркера будут описываться нормальным распределением, а расчетная величина расходов воды должна описываться обратным нормальным распределением. Характерной особенностью данного распределения является то, что оценки средних значений и дисперсий несостоятельны. Впервые показано, что при низкой изменчивости концентрации маркера $C(t)$ оценки $Q(t)$ состоятельны. Эффективным способом повышения устойчивости измерений расходов воды являются использованием гирлянды из датчиков N_d при максимальной ширине зоны смешения $L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d \sqrt{N_d}}$ и увеличение расстояния от начального до контрольного створов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гос. задания №124020500053-6.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 124020500053-6.

Литература / References

1. Wood P.J., Dykes A.P. The use of salt dilution gauging techniques: ecological considerations and insights. Water Research, 2002, vol. 36, pp. 3054–3062.

2. Acosta-Motos J.R., Ortuño M.F., Vicente A. B., Diaz-Vivancos P., Sanchez-Blanco M. J., Hernandez J. A. Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. Agronomy, 2017. vol. 7 (18). 38 p.
3. Pang H., Xin X., He J., Cui B., Guo D., Liu S., Yan Z., Liu C., Wang X., Nan J. Effect of NaCl Concentration on Microbiological Properties in NaCl Assistant Anaerobic Fermentation: Hydrolase Activity and Microbial Community Distribution. Frontiers in Microbiology, 2020, vol. 11, pp. 1–10.
4. Бернадский Н.М. Измерение расходов воды химическим методом. СПб. 1913.
5. Риммар Г.М. Применение электропроводности для определения расходов воды методом смешения // Труды ГГИ, в. 36 (90): ГИМИЗ, 1952. С.18–48.
6. Schloeseng M. Th. Nouvelle methode pour juger les fluids. Comples rendus du deuxieme semester de l'Acadamie des Sciences. Paris, 1863.
7. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Лубенцов А.С., Пнюшков А.Д. Измерение малых расходов воды методом постоянного пуска соляного раствора // Сб.: Рос. форум изыск.. Сб. докл. IV Межд. научно-практ. конф. М. 2022. С. 159–171.
8. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Кулешов А.В. О развитии метода ионного паводка для определения расхода воды // Сб. тр. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» им. Л. Н. Карлина, С.-П. / MGO-2022. М.: Изд-во «Перо». – 2022. – С. 257–260.
9. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Лубенцов А.С. Метод ионного паводка как инструмент гидрологического мониторинга в горных районах. Специфика и перспективы // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Ростов-на-Дону. Из-во: ООО «Лик» (Новочеркасск). 2023. С. 176–181.
10. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions. Wiley. 1994. Vol. 1. 171 p.
11. Springer M.D. The Algebra of Random Variables. Wiley. 1979. 492 p.
12. Sappa G., Ferranti F., Pecchia G. M. Validation of Salt Dilution Method for Discharge Measurements in the Upper Valley of Aniene River (Central Italy). Recent Advances in Environmental, Ecosystem and Development, 2015, pp. 42–48.
13. Merz J., Doppmann G. Measuring Mountain Stream Discharge Using the Salt Dilution Method: A Practical Guide. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2006, pp. 1–14.
14. Lane S.N., Parsons D.R., Best J.L., Orfeo O., Kostaschuk R.A., Hardy R.J. Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Rio Parana and Rio Paraguay, Argentina. JGR: Earth Surface, 2008, vol. 113, F02024. DOI:10.1029/2006JF000745.
15. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Колчанов В.Ю., Gualtieri C., Lane S.N., Roux B. Гидродинамические аспекты слияния рек с различными плотностями вод // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 4. С. 381–392.
16. Bouchez J., Lajeunesse E., Gaillardet J., France-Lanord C., Dutra-Maia P., Maurice L. Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. Earth Planet. Sci. Lett., 2010, vol. 290, pp. 37–43. DOI:10.1016/j.epsl.2009.11.054.
17. Mackay J.R. Lateral mixing of the Liard and Mackenzie rivers downstream from their confluence // Canadian Journal of Earth Sciences, 1970, vol. 7., pp. 111–124. DOI:10.1139/e70-008.
18. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 639 с.
19. Математическое моделирование в управлении водопользованием (под ред. А.М. Черняева). Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. 520 с.

Поступила в редакцию / Received 23.11.2025

Принята к публикации / Accepted 11.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия, SPIN-код: 7569-1702, https://orcid.org/0000-0003-0327-4894, Author ID Scopus: 57474212500, Author ID: 1226076, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru.

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия, SPIN-код: 7621-8001, https://orcid.org/0000-0001-9874-3424, Author ID: 147950, Author ID Scopus: 56370650100, e-mail: lepihin49@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana N. Sintsova, leading engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, SPIN-code: 7569-1702, https://orcid.org/0000-0003-0327-4894, Author ID Scopus: 57474212500, Author ID: 1226076, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru.

Anatoly P. Lepikhin, D.Sc. (Geography), Head of the Laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, SPIN-code: 7621-8001, https://orcid.org/0000-0001-9874-3424, Author ID: 147950, Author ID Scopus: 56370650100, e-mail: lepihin49@mail.ru.