

УДК 556.078;556.042

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ НА НЕБОЛЬШИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ¹

© 2023 г. А. П. Лепихин^а, Ю. С. Ляхин^{а, *}, А. И. Лучников^б

^аПермский ФИЦ УрО РАН, Пермь, 614015 Россия

^бКамский филиал “РосНИИВХ”, Пермь, 614002 Россия

*e-mail: ljahin85@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 17.06.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Небольшие озера и водохранилища, расположенные в зонах активного техногенеза, подвергаются риску различных аварийных ситуаций. Современные вычислительные технологии, включающие в себя гидродинамические расчетные модули, позволяют достаточно эффективно оценивать и прогнозировать их последствия с целью минимизации негативного воздействия. Эти модели требуют задания коэффициентов горизонтальной диффузии. Теоретический анализ этих процессов из-за их специфики весьма затруднен. В России и в других странах очень мало экспериментальных исследований, посвященных оценке этих коэффициентов даже в приближении их однородности и изотропности. Современные технологии измерений, связанные с использованием беспилотных летательных аппаратов, позволяют значительно упростить проведение таких исследований. Обсуждается актуальность таких работ, технология их выполнения и полученные результаты на примере Верхне-Зырянского водохранилища. На основе натурного эксперимента с запуском восьми поплавков получена средняя оценка коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии, равная $0.012 \text{ м}^2/\text{с}$. Обсуждены особенности полученных результатов.

Ключевые слова: коэффициент горизонтальной диффузии, беспилотный летательный аппарат, натурный эксперимент, Лагранжевый подход, водохранилище.

DOI: 10.31857/S0321059623020116, **EDN:** IJVBVM

ВВЕДЕНИЕ

Решение широкого круга как практических, так и теоретических задач, связанных, например, с обеспечением устойчивости водопользования, с формированием гидрохимических полей в поверхностных водных объектах, требует проведения детальных гидродинамических расчетов. В настоящее время имеется достаточное количество программных продуктов, позволяющих проводить расчеты распределения гидродинамических и гидрохимических характеристик по акватории водного объекта. При этом необходимо учитывать, что существенное влияние на результаты расчетов оказывает корректность задания различных исходных параметров водного объекта и параметризация коэффициентов турбулентной диффузии. Построение и параметризация гидро-

динамических моделей для небольших озер и водохранилищ весьма сложны. С одной стороны, эти объекты, как правило, активно используются в хозяйственной деятельности и испытывают значительные антропогенные нагрузки. В то же время гидродинамические модели, позволяющие в значительной мере объективно описывать эти воздействия, с целью их минимизации строятся обычно для крупных водоемов с использованием при этом многих технологических проработок, полученных в океанологии.

Гидродинамике данных объектов и параметризации происходящих в них процессов горизонтального перемешивания посвящено небольшое количество исследований. На это обращается внимание в основном в зарубежных публикациях [21, 28–30]. В России практически единственное исследование, где оценка коэффициентов горизонтальной диффузии в водохранилище дается на основе натурных экспериментальных измерений, — работа Н.В. Буторина [1], выполненная еще в 1968 г. Практически в это же время был выполнен

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29.12.2020 г., номер регистрации 122012000402-4), РФФИ (проект 20-45-596028).

комплекс исследований, включающий и оценку коэффициентов диффузии для оз. Байкал [16]. При решении прикладных задач, например на Камских водохранилищах [6], достаточно часто используются некоторые эмпирические соотношения, предложенные В.А. Знаменским [5], а также расчетные соотношения по оценке коэффициентов диффузии, полученные А.В. Караушевым [11]. Это объясняется как значительной трудоемкостью таких исследований, так и существенным влиянием индивидуальных морфометрических особенностей на характер рассматриваемых процессов. Ставшие классическими закономерности горизонтального обмена, установленные для морей и крупных озер, где создаются необходимые условия для реализации локально-изотропной турбулентности, не работают на небольших водоемах, как подчеркивается целым рядом исследователей, [28–30, 35, 37, 38]. Прямой перенос закономерностей и зависимостей, полученных на крупных водных объектах, на малые, тем более расположенные в зонах активного техногенеза, как правило, оказываются некорректными. Данная ситуация привела к тому, что во многих достаточно широко используемых программных продуктах, например ADH [19], Delft 3D [20], SMS [32], рассматриваются следующие три независимых способа задания коэффициентов горизонтальной дисперсии: самостоятельное задание на основе некоторой априорной информации; оценка на основе числа Пекле-Ре, критические значения которого принимаются укрупненно (таблично) в зависимости от характера водного объекта; автоматический расчет на основе схемы Смагоринского [32]. Однако в этом случае должна использоваться детальная вихре-разрешающая модель. В противном случае нет основания для использования данной схемы.

Поэтому при исследовании таких объектов необходимо сочетание современных отработанных технологий с детальным учетом индивидуальных морфометрических особенностей конкретных водных объектов.

Особое значение приобретает проведение натурных экспериментов по оценке эффективных коэффициентов горизонтального перемешивания. При этом необходимо учитывать, что организация проведения натурных экспериментов с красящими веществами на водных объектах — источниках водоснабжения, активно используемых для целей рекреации и рыбного хозяйства, — весьма затруднительно. Поэтому актуальна задача отработки новых технологий оценки данного коэффициента и установление зависимости рассматриваемых коэффициентов от масштаба явления. Как отмечено в [9, 12, 31], данные задачи весьма эффективно решаются при использовании так называемой Лагранжевой технологии, строящейся на проведении экспериментов с по-

плавками и оценкой интенсивности их “растаскивания”.

Наиболее сложный и ответственный этап данных экспериментов — оперативная фиксация изменения положения поплавков во времени. Использование наземных береговых средств возможно только при проведении экспериментов непосредственно в прибрежной зоне. При наблюдении поплавков на расстоянии существенно >100 м от берега возникают проблемы с оценкой изменения координат их положения во времени. При использовании в эксперименте N поплавков в каждый расчетный момент времени необходи-

мо оценивать $P = \frac{N(N-1)}{2}$ комбинаций расстояний между отдельными поплавками. В океанологии эксперименты с высокотехнологичными поплавками-дрифтерами, проводимые с 1979 г. в рамках глобальной дрифтерной программы, — основной источник исходных данных по крупномасштабной и мезомасштабной океанической диффузии [3, 9]. Однако эксперименты с использованием современных высокотехнологичных дрифтеров, позволяющих весьма точно оценивать динамику перемещения, весьма дорогостоящи и малопригодны для небольших внутренних водоемов. Поэтому актуален поиск новых альтернативных технологий. В качестве современной альтернативы могут быть рассмотрены технологии на основе использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это открывает принципиально новые возможности в проведении подобных экспериментов. Ранее технология с использованием БПЛА успешно отрабатывалась при актуальном исследовании динамики береговых полос рек и водохранилищ [4, 10]. Опыт применения данной технологии для оценки параметров атмосферной турбулентности обсуждается в [17, 18].

ПРОБЛЕМА ПАРАМЕТРИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ ДЛЯ НЕБОЛЬШИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В настоящее время вопросы параметризации процессов турбулентного перемешивания наиболее проработаны для локально-изотропной турбулентности и течений с вертикальным сдвигом. Если для крупных водных объектов (морей, больших озер) для описания процессов горизонтального перемешивания весьма эффективны модели на основе локально-изотропной турбулентности, то для рек традиционно используются модели со сдвигом. Если в крупных водоемах основной поставщик энергии турбулентности — ветровые нагрузки, в реках — гидравлические уклоны, то в небольших проточных водохранилищах (озерах)

вклад этих факторов может существенно меняться как во времени, так и по акватории.

Существует несколько взаимосвязанных механизмов горизонтального перемешивания в водных объектах. В крупных водоемах, где в больших масштабах обеспечиваются условия для однородной и изотропной турбулентности, где существуют значительные интервалы, в которых наблюдаются постоянные скорости диссипации турбулентной энергии $\epsilon - [m^2/c^3]$, в соответствии с гипотезой А.Н. Колмогорова [7], исходя из анализа размерностей коэффициент горизонтальной диффузии должен описываться следующими соотношением:

$$K(l) = c\epsilon^{1/3}l^{4/3}, \quad (1)$$

где c — эмпирический коэффициент, l — линейные размеры диффундирующего облака.

Многочисленные экспериментальные исследования показали выполнимость соотношения при больших масштабах данного явления [25–27, 33, 34, 36].

В то же время отмечается, что в мелководных или стратифицированных водоемах зависимость (1) приобретает более общий характер [2, 12–14]:

$$K(l) = bl^\beta, \quad (2)$$

при этом $b = [L^{2-\beta}T^{-1}]$ не зависит от времени и размеров облака l . Так же величина коэффициента β существенно зависит от характера водного объекта и может существенно меняться. В то же время коэффициент β определяется как морфометрией водоема, его стратификации, так и состоянием его водной поверхности и может существенно отклоняться от классических $4/3$ [28–30]. При этом, если в водном объекте доминируют вихревые структуры одного размера, то $\beta \rightarrow 0$, соответственно $K(l) \rightarrow \text{const}$.

Значимые результаты в исследовании горизонтальной диффузии получены А. Окубо (А. Okubo) [25–27]. В работе Н.А. Лабзовского [8] на основе экспериментальных исследований на озерах показано, что величина данного коэффициента зависит от их орографии, трения о дно и расстояния до берега.

Большой интерес для данной задачи представляет оценка влияния скорости ветра на величину коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии. Так как данный коэффициент определяется в первую очередь наличием вихревых структур, изменение только скорости течения не может оказывать влияние на этот коэффициент. В [23–25] представлены экспериментальные данные по влиянию скорости ветра на величину рассматриваемого параметра. Как следует из [23, 24], даже в диапазоне скоростей ветра от 0 до 7.5 м/с отчетливо не прослеживаются эти связи. Теоре-

тический анализ данной проблемы рассмотрен в [2], где указывается: “...разные зависимости коэффициентов турбулентной диффузии пятна примеси от его размера в присутствии волнения могут быть объяснены разным возрастом волн, их эволюцией в связи с изменчивостью ветра”.

В целом, чем меньше водный объект, тем более значимо будут проявляться особенности его морфометрии в характере горизонтальной турбулентной диффузии. Поэтому интерес представляет экспериментальная оценка данных коэффициентов на примере конкретного водного объекта. В настоящей работе эти особенности коэффициента турбулентной диффузии рассматриваются на конкретном примере поверхностного водного объекта, имеющего важное хозяйственное значение, — Верхне-Зырянского водохранилища.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Верхне-Зырянское водохранилище расположено в долине р. Зырянки, образованной в результате слияния рек Извер и Легчим. Бассейн реки расположен на западных предгорьях Уральского хребта в границах Пермского края (рис. 1). Длина реки — 53 км. Площадь водосбора в створе плотины составляет 251 км². Среднегодовой расход воды — 2.42 м³/с, средний многолетний объем стока ~75 млн м³. Зырянка — левобережный приток р. Камы, впадающий в нее в 939 км от устья (в 196 км выше Камского гидроузла) у г. Березники.

Верхне-Зырянское водохранилище образовано низконапорной плотиной и водосбросом (водосливом с широким порогом). Это водохранилище сезонного регулирования стока. Оно введено в постоянную эксплуатацию в 1969 г. [15]. Основные характеристики объекта исследования приведены в табл. 1.

В настоящее время основное назначение Верхне-Зырянского водохранилища — промышленное водоснабжение предприятий г. Березники: Березниковского калийного производственного рудоуправления № 2 (БКПРУ-2), Березниковского калийного производственного рудоуправления № 4 (БКПРУ-4) и рекреации. Суммарный объем сбора воды в 2020 г., по фактическим данным, составил ~6.3 млн м³.

Характерная особенность данного водного объекта — наличие существенной вертикальной неоднородности водных масс. Вертикальная стратификация водных масс этого водоема сильно затрудняет устойчивое техническое водоснабжение из водоема [22].

Распределение глубин по акватории рассматриваемого водного объекта представлено на рис. 1.

В целом, Верхне-Зырянское водохранилище характеризуется следующими параметрами: “характерная глубина” $h \sim 6$ м; толщина верхнего

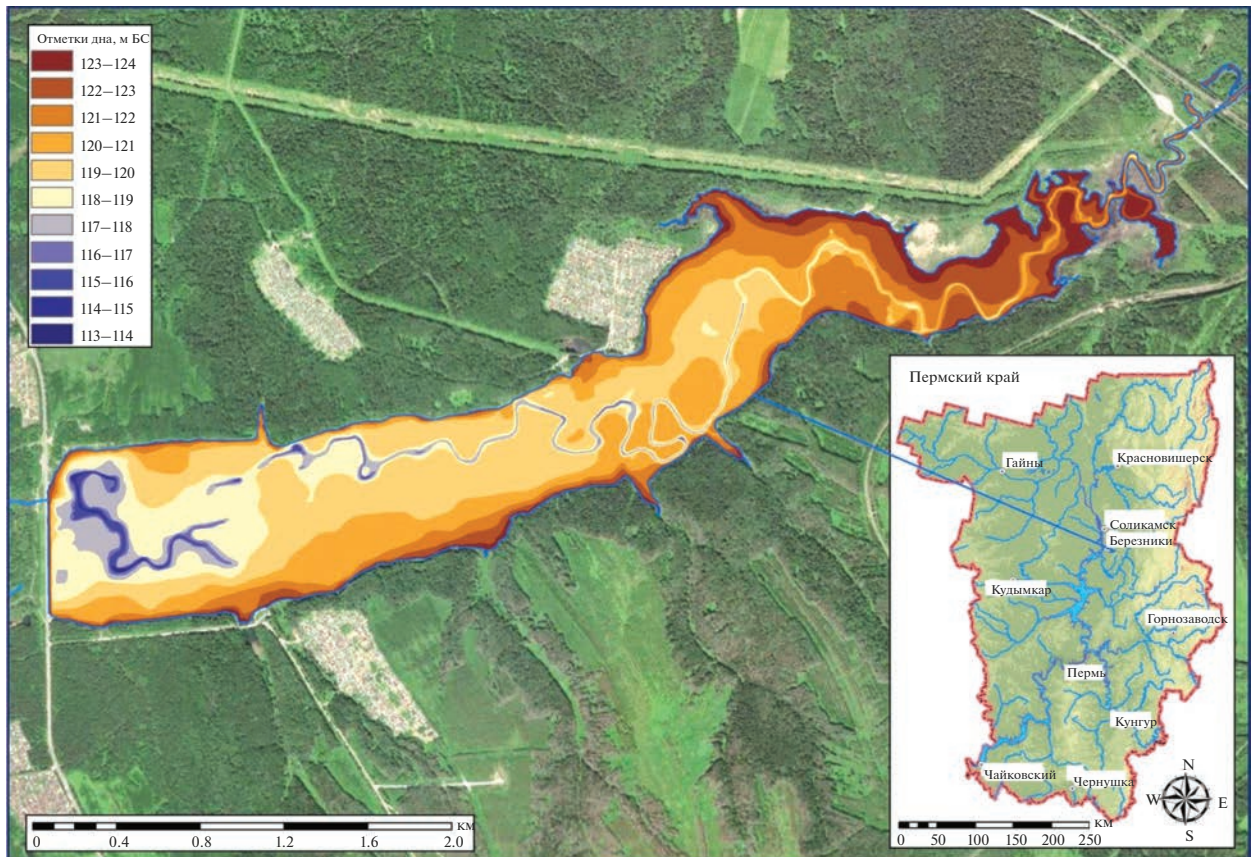


Рис. 1. Распределение глубин в абсолютных отметках по акватории Верхне-Зырянского водохранилища.

“опресненного” слоя $h_0 \sim 3$ м; ширина $L \sim 1000$ м; относительная разница плотностей верхнего и нижнего слоев водных масс $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$; характерная скорость течения в штילевых условиях $V \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ м/с.

Во время проведения натурного эксперимента (27.09.2021) расход воды в р. Зырянке и гидрологический режим были достаточно близки к многолетним с характерным расходом притока ~ 2 м³/с.

Таблица 1. Основные параметры и характеристики Верхне-Зырянского водохранилища

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Величина
1	Отметка нормального подпорного уровня воды (НПУ)	м БС	124.0
2	Отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ)	м БС	124.6
3	Отметка уровня наибольшей сработки (УНС)	м БС	123.0
4	Отметка уровня мертвого объема (УМО)	м БС	121.0
5	Объем воды при НПУ	млн м ³	12.7
6	Площадь акватории при НПУ	км ²	3.5
7	Длина водохранилища	км	6.8
8	Средняя ширина	км	0.51
9	Максимальная ширина	км	0.95
10	Средняя глубина	м	3.65
11	Максимальная глубина	м	11.2



Рис. 2. Используемое оборудование и материалы при выполнении работ.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Натурный эксперимент по оценке коэффициентов горизонтальной дисперсии был проведен 27.09.2021. Непосредственное начало эксперимента – 12:20 по местному времени. Для решения поставленной задачи на основе использования БПЛА применены следующие оборудование и материалы (рис. 2):

- квадрокоптер “DJI Phantom 4 Pro” (2 комплекта);
- портативная метеостанция “Kestrel 4500”;
- поплавки (9 шт.);
- буйки (4 шт.);
- лодка “Stingray” с двигателем “Yamaha”.

При подготовке к эксперименту на акватории Верхне-Зырянского водохранилища были установлены 4 контрольных буйка. Буйки выполнены из пластиковых емкостей объемом 20 л. Также наверху буйков закреплялись яркие (желтые) планшеты размером 0.45×0.45 м для лучшего определения их на фотографиях. При установке на акватории буйки якорились и пригружались

в воду почти полностью (до планшетов), чтобы получить максимальное вертикальное натяжение.

В качестве поплавков использованы планшеты диаметром ~ 0.6 м, выполненные из OSB-плиты толщиной 6 мм, в форме восьмиугольников, окрашенных в разные цвета (8 шт.). Дополнительно, чтобы оценить степень влияния ветра на движение поплавков, был изготовлен 1 планшет аналогичного размера, выполненный из пенополистирола толщиной 40 мм (плотность ~ 30 кг/м³).

Метеорологические условия

Основные параметры метеорологических условий получены при помощи автоматической портативной метеостанция “Kestrel”, установленной на берегу водохранилища в районе проведения эксперимента. На рис. 3 представлены графики изменения скорости и направления ветра.

Как следует из рис. 3, во время проведения эксперимента наблюдался весьма слабый ветер постоянного направления ($\sim 250^\circ$), что соответствует северо-восточному направлению ветра.

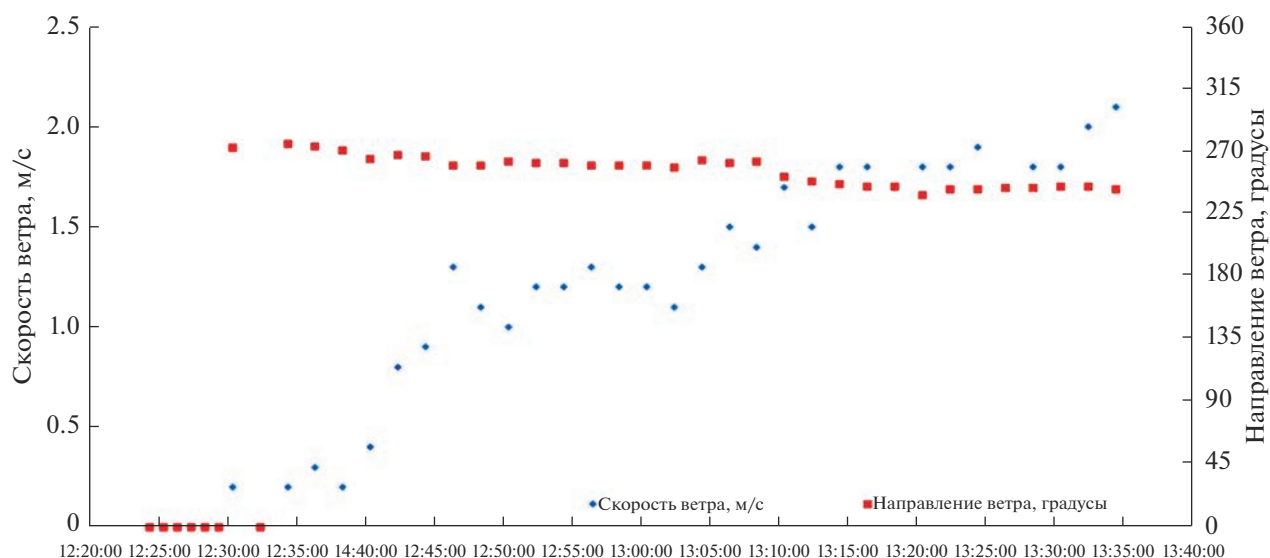


Рис. 3. Графики изменения скорости и направления ветра в период проведения эксперимента.

При этом следует отметить, что если в начале проведения эксперимента наблюдались практически штилевые условия, то к окончанию он усилился до ~ 2 м/с.

Эксперимент состоял из нескольких взаимосвязанных этапов:

1. установка буйков на акватории;
2. установка портативной метеостанции на высоте 2.0 м над поверхностью воды, включение автоматической записи метеопараметров с интервалом 2 мин;
3. подготовка и настройка БПЛА; взлет, позиционирование и зависание квадрокоптера над центром акватории в месте спуска поплавков; режим интервальной съемки — 1 кадр через 60 с; угол съемки — 90° (в надири);
4. спуск поплавков на акваторию с лодки; перемещение лодки к берегу после спуска поплавков осуществлялось плавно, на веслах, чтобы минимизировать воздействие на поверхностный слой водной массы.

Каждые 18–20 мин в непосредственной близости от снимающего квадрокоптера на такую же высоту выводился второй квадрокоптер. Выполнялось позиционирование камеры и перевод в режим интервальной съемки. После этого первый квадрокоптер возвращался на точку взлета для замены аккумуляторной батареи. Всего выполнено 4 взлета, неразрывное время интервальной съемки — 70 мин.

Обработка полученной информации

На первоначальном этапе каждый снимок был обработан в программной среде “ArcMap”.

В частности, каждая фотография была точно переориентирована по сторонам света и масштабирована над акваторией с помощью буйков и береговой линии.

Далее была проведена оцифровка местоположения каждого поплавка на всех снимках в единой системе координат (UTM 40N). Для оцифрованных данных поплавков вычислены плановые координаты. В итоге был получен массив данных плановых координат для девяти поплавков за 70 мин. На рис. 4 представлены фрагменты оригинальных фотографий, по которым проводилась оцифровка.

На рис. 5 представлено перемещение поплавков за весь период времени.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используемые технологии с применением БПЛА позволяют проводить оцифровку маршрутов (координаты) перемещения каждого поплавка в фиксируемые моменты времени с шагом в несколько секунд и с абсолютной погрешностью определения местоположения < 0.1 м. Это значительно меньше размера самого поплавка. На основе полученных координат перемещающихся поплавков в фиксируемые моменты времени рассчитывались абсолютные скорости перемещения как легкого, так и “тяжелых поплавков”. Скорость их перемещения в зависимости от времени представлена на рис. 6. Скорость перемещения поплавков отражает с определенной инерцией наблюдаемую скорость ветра (рис. 3, 6).

Из данных рис. 6 следует, что скорость перемещения рассматриваемых поплавков меняется мало — от ~ 0.01 м/с в начале эксперимента при усло-

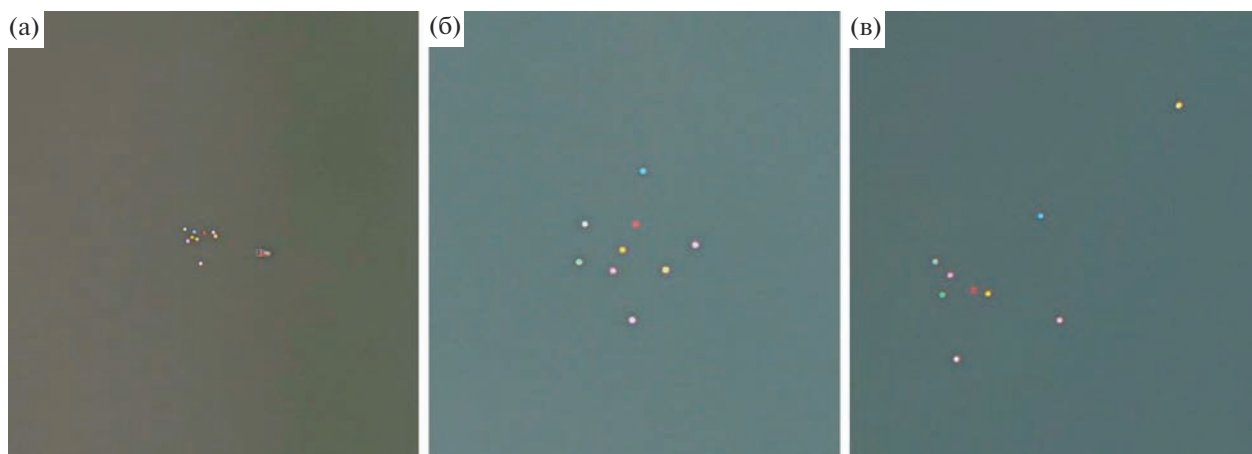


Рис. 4. Фрагменты фотографий в различные периоды времени: а – 5, б – 25, в – 65 мин.

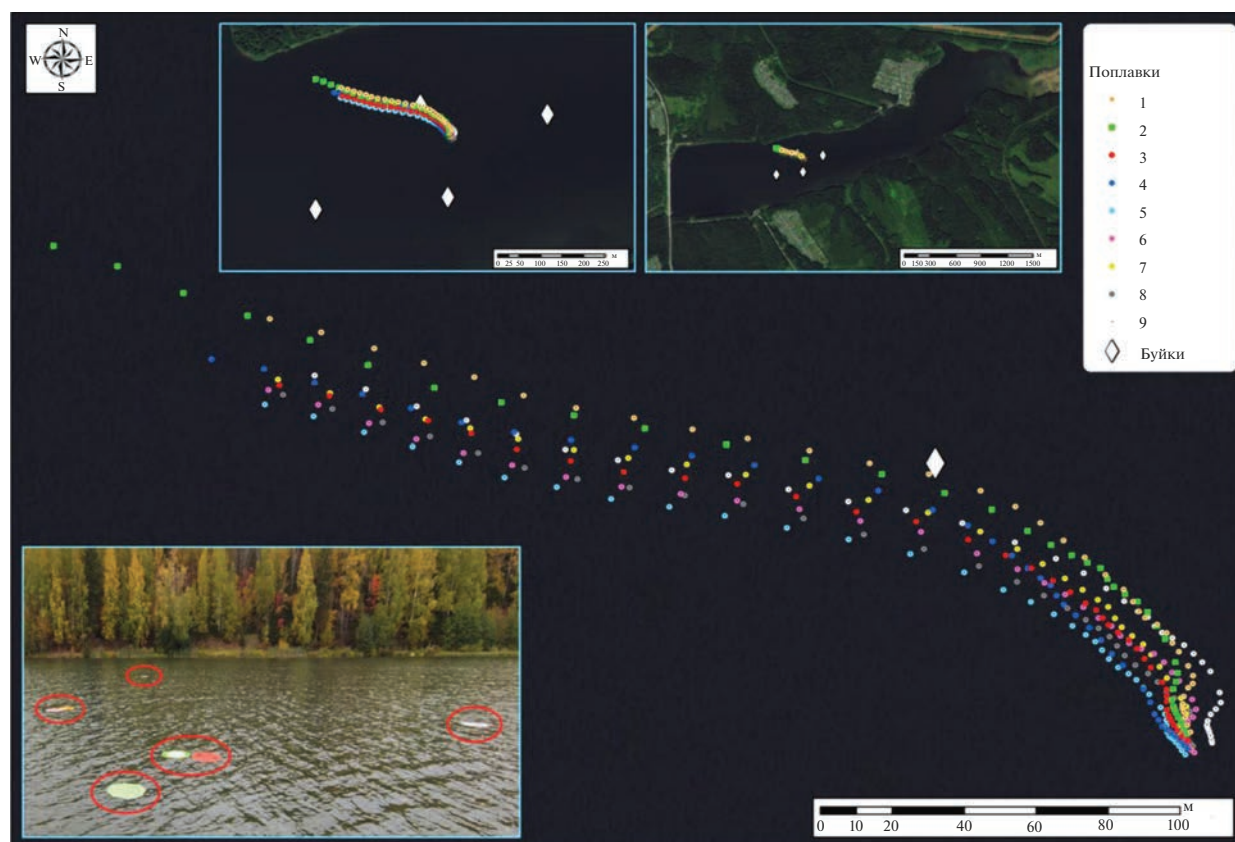


Рис. 5. Картограмма изменения положения поплавков по акватории Верхне-Зырянского водохранилища за 70 мин (зеленый квадрат под № 2 – поплавок из пенополистирола).

виях, близких к штилевым, до ~ 0.12 м/с – при увеличении скорости ветра до 2 м/с.

На завершающей стадии обработки полученной информации по миграции поплавков была оценена динамика изменений дисперсии расстояний между отдельными поплавками. Эта харак-

теристика имеет принципиально важное практическое значение, так как характеризует интенсивность распространения зоны загрязнения. Эти оценки – исходная информация при моделировании различных возможных аварийных ситуаций.

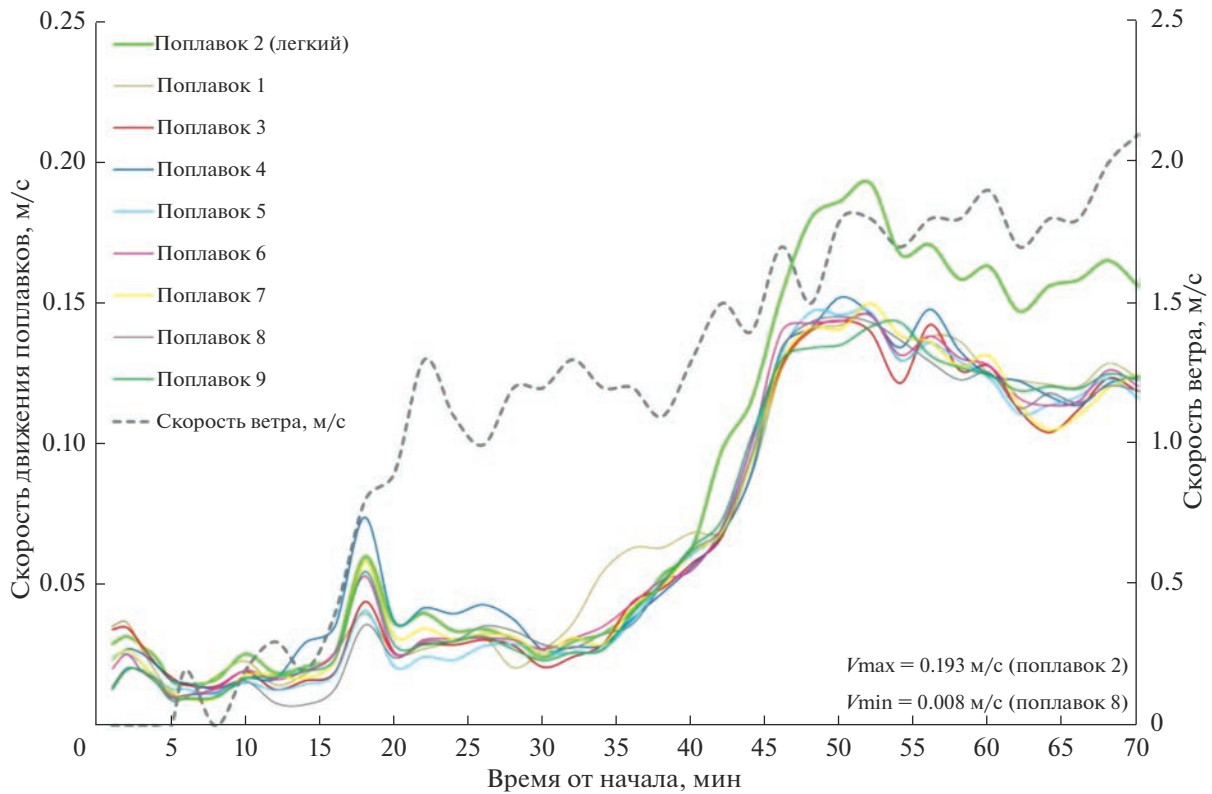


Рис. 6. Зависимость скорости перемещения поплавков во времени.

При этом наряду с оценкой дисперсии поплавков на основе традиционной схемы по Ричардсону [33]

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{it} - \bar{x}_t)^2 + (y_{it} - \bar{y}_t)^2 \quad (3)$$

рассчитан средний квадрат расстояния между каждой парой поплавков:

$$\langle L_{ijt}^2 \rangle = \langle (x_{it} - x_{jt})^2 + (y_{it} - y_{jt})^2 \rangle. \quad (4)$$

Несложно видеть, что оценки (3) и (4) должны быть тесно связаны между собой, так как

$$\sigma_t^2 \sim \frac{1}{2} \left(\langle L_{ijt}^2 \rangle - 2(r_{xx}\sigma_x^2 + r_{yy}\sigma_y^2) \right), \quad (5)$$

σ_x^2 — дисперсия частиц по оси x , σ_y^2 — дисперсия частиц по оси y , r_{xx} и r_{yy} — коэффициенты корреляции флуктуаций частиц по осям x и y соответственно.

Видно, что если флуктуация поплавков статистически независима, т. е. $r_{xx} \sim r_{yy} \approx 0$, то $\sigma_t^2 = \frac{1}{2} \langle L_{ijt}^2 \rangle$.

Данная особенность поведения поплавков в небольших водоемах хорошо подтверждается результатами расчетов, представленных на рис. 7.

Как следует из рис. 7, в динамике дисперсий достаточно отчетливо выделяются два линейных участка с существенно различающимися углами наклона. При этом коэффициенты линейной регрессии для каждого временного интервала оцениваются как $p_{t2,t1} = \frac{\sigma_{e2}^2 - \sigma_{e1}^2}{t_2 - t_1}$.

Для первого участка протяженностью 0–1500 с — среднее значение $p \sim 0.043$, а для второго протяженностью 1500–4200 с — $p \sim 0.011$. Различие данных коэффициентов представляется статистически значимым (коэффициент Стьюдента — 4.5). В то же время среднеквадратическое отклонение данных коэффициентов для первого временного интервала ($\sigma_{p1} \sim 0.019$) значительно меньше, чем для второго ($\sigma_{p2} \sim 0.028$). Среднее за весь период наблюдений значение $\bar{p} \sim 0.023$.

Так как коэффициент горизонтальной диффузии, согласно схеме Ричардсона [2, 21, 31], $K \sim 1/2 \frac{d\sigma^2}{dt}$, то при степенной аппроксимации $\sigma^2(t) = pt^\gamma$, используемой в большинстве экспериментов, имеем, соответственно, $K = p\gamma t^{\gamma-1}$. При линейной зависимости (если $\gamma = 1$, $\sigma^2 \sim pT$)

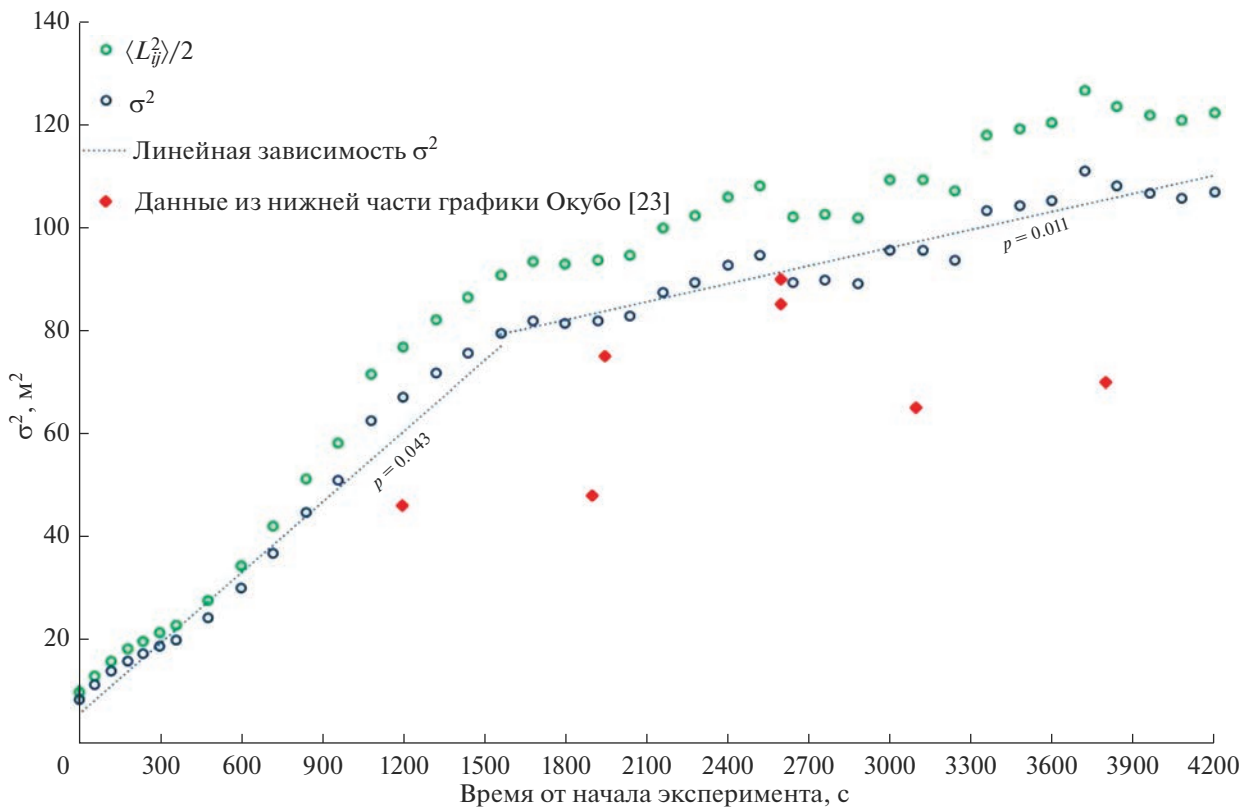


Рис. 7. Динамика дисперсии поплавок по результатам эксперимента.

$K \sim \frac{1}{2}p$, т. е. для первого участка коэффициент диффузии составляет $K_1 \sim 0.023$, для второго — $K_2 \sim 0.005$, а среднее значение за весь период наблюдений $K_{\text{ср}} \sim 0.012 \text{ м}^2/\text{с}$.

По-видимому, оценки, полученные за первый — начальный временной интервал, когда поплавок только приходит в движение, вряд ли могут рассматриваться как достаточно корректные. На их динамику, вероятно, существенное влияние оказывают инерционные силы. В то же время в первом временном интервале наблюдались практически штилевые условия, а во втором скорость ветра усилилась до 1.5–2 м/с. Определенная независимость коэффициентов горизонтальной диффузии от скорости ветра, как отмечалось, показана также в [23]. В целом, объяснение наблюдаемых эффектов должно стать предметом дальнейших междисциплинарных исследований.

На небольших водных объектах в силу ограниченности их масштабов размеры вихревых структур, определяющих интенсивность перемешивания, также должны быть весьма ограничены. Они должны быть значимо меньше размеров самого водного объекта. Установление для рассматриваемых коэффициентов зависимости $K(L) \sim f(L)$ аналогично (1), (2) — весьма затруднено и вряд ли мо-

жет иметь существенное практическое значение. Для таких объектов вполне можно использовать допущение $K(L) \sim \text{const}$.

Так как при решении прикладных задач коэффициент горизонтальной диффузии используется в первую очередь при оценке последствий различных аварийных ситуаций, характеризующихся в активной фазе относительно небольшими временными масштабами, данные оценки могут быть эффективны.

ВЫВОДЫ

Малые и небольшие водные объекты, как правило, в наибольшей степени подвергаются техногенным воздействиям. В то же время гидродинамические модели для данных объектов весьма чувствительны к их морфометрии, при этом наибольшую сложность вызывает параметризация для них коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии. Поэтому весьма актуальна разработка эффективных технологий экспериментальной оценки коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии.

Лагранжевый подход на основе данных дрейфа поплавок — наиболее эффективный инструмент исследования и оценки коэффициентов горизонтальной диффузии в водных объектах. При этом

имеются два принципиально разных подхода к реализации данной технологии. В океанологии основное внимание уделяется повышению технологичности самих поплавков-дрифтеров, в то же время при исследовании малых водоемов основное внимание может быть уделено методам фиксации положения поплавков на основе использования БПЛА.

Современные БПЛА все более активно внедряются в практику полевых гидрологических исследований. Имеется успешный опыт их применения для оценки динамики берегов водных объектов, обследованию водоохранных зон, построению цифровых моделей рельефа и др. Возможность фиксирования с высокой надежностью координат объектов на водной поверхности делает БПЛА весьма эффективным инструментом экспериментальной оценки коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии. Эта возможность рассмотрена на примере Верхне-Зырянского водохранилища, имеющего важное значение в техническом водоснабжении промышленных предприятий Березниковского промузла.

На Верхне-Зырянском водохранилище, расположенном на юго-восточной окраине г. Березники, выполнены эксперименты с использованием 11 поплавков и двух БПЛА, которые позволили определить коэффициент горизонтальной диффузии: $\sim 0.023 \text{ м}^2/\text{с}$ для временного интервала $T < 1500 \text{ с}$, $\sim 0.005 \text{ м}^2/\text{с}$ — для временного интервала $1500 < T < 4200 \text{ с}$ (в среднем за весь период наблюдений $\sim 0.012 \text{ м}^2/\text{с}$).

При увеличении скорости перемещения поплавков на порядок вследствие усиления ветра не наблюдается статистически значимой разницы значений рассматриваемых параметров. Их инвариантность относительно скорости ветра обусловлена тем, что в рассматриваемом случае ветер усиливает только скорость течения в поверхностном слое, но не формирует вихревые структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буторин Н.В., Литвинов А.С. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище // Тр. ин-та биологии внутрен. вод АН СССР. Борок, 1968. С. 250–258.
2. Голицын Г.С. Коэффициент турбулентной диффузии примеси на водной поверхности в зависимости от стадии развития волнения // Изв. РАН ФАО. Т. 47. № 3. 2011. С. 426–432.
3. Журбас В.М., Лыжков Д.А., Кузьмина Н.П. Оценка коэффициентов бокового перемещения по данным дрейфтеров // Океанология. Т. 15. № 3. 2014. С. 309–317.
4. Зарипов А.С., Лучников А.И. Исследование динамики разрушения берегов Камского и Воткинского водохранилищ в результате абразии по материалам аэрофотосъемки // Геориск. 2021. № 1. С. 58–66.
5. Знаменский В.А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 248 с.
6. Китаев А.Б., Девяткова Т.П. Особенности турбулентного обмена вод в Камском и Воткинском водохранилищах и методы его оценки // Геогр. вестн. 2006. № 2. С. 67–75.
7. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // ДАН СССР. Т. 30. № 4. 1941. С. 299–303.
8. Лабзовский Н.А. Турбулентная диффузия в озерах // Изменчивость гидрофизических полей в озерах. Л.: Наука, 1978. С. 117–146.
9. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Назирова К.Р., Краюшкин Е.В., Жук Е.В. Использование мини-дрейфтеров для проведения подспутниковых измерений параметров прибрежных течений // Исследование земли из космоса. 2019. № 5. С. 36–49.
10. Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Вод. хоз-во России. 2018. № 1. С. 37–46.
11. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод // Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 176 с.
12. Озмидов Р.В. Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в море и искусственном водоеме небольшой глубины // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1957. № 6. С. 756–764.
13. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
14. Окубо А., Озмидов Р.В. Эмпирические соотношения между коэффициентами горизонтальной диффузии и масштабом явления // Изв. АН СССР. ФАО. 1970. Т. 6. № 5. С. 534–536.
15. Правила использования водных ресурсов Верхне-Зырянского и Нижне-Зырянского водохранилищ. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2021. 75 с.
16. Течения и диффузия вод Байкала // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. 1970. Т. 14/34. 214 с.
17. Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Живоглозов Д.Н., Зайцева Д.В., Калягин М.Ю., Кузнецов Д.Д., Кунашук А.А., Шевченко А.М., Шестакова А.А. Опыт исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с помощью беспилотного летательного аппарата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 57. № 5. 2021. С. 602–610. <https://doi.org/10.31857/S0002351521050047>
18. Шелехов А.П., Афанасьев А.Л., Шелехова Е.А., Кобзев А.А., Тельминов А.Е., Молчунов А.Н., Поплевина О.Н. Использование малоразмерных БПЛА для измерения турбулентности в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 611–624. <https://doi.org/10.31857/S0002351521050138>

19. *Berger R.C., Tate J.N., Brown G.L., Savant G.* Adaptive Hydraulics (AdH) Version 4.5. // Hydrodynamic User Manual. 2015.
20. *Delft 3D-Flow Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual.* Delft Deltares. 2011. 672 p.
21. *Imboden D.M., Wuest A.* Mixing mechanisms in lakes, in *Physics and Chemistry of Lakes* / Eds *A. Lerman, D. Imboden, J. Gat*. New York: Springer-Yerlag, 1995. P. 83–138.
22. *Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Bogomolov A., Lyakhin Y., Tiunov A.* Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (on the example of the Verkhne-Zyryansk reservoir, Russia) // *Water. Switzerland*. 2021. T. 13. № 12. <https://doi.org/10.3390/w13121638>
23. *Matsuzaki Y., Fujita I.* Horizontal turbulent diffusion at sea surface for oil transport simulation // *Coastal Management, Environment, and Risk*. 2014. № 34. P. 1–10. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.management.8>
24. *Matsuzaki Y., Fujita I.* In situ estimates of horizontal turbulent diffusivity at the sea surface for oil transport simulation // *Mar. Pollution Bull.* 2017. V. 117. P. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.026>
25. *Okubo A.* Some remarks on the importance of the “Shear effect” on horizontal Jusion // *Oceanogr.* 1968. №. 24. P. 60–69.
26. *Okubo A.* Some speculation on oceanic diffusion diagrams. *Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 1974. V. 167. P. 77–85.
27. *Okubo A., Ebbesmeyer C.C.* Determination of vorticity, divergence, and deformation rates from analysis of drogue observations // *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.* 1976. V. 23. P. 349–352.
28. *Pal K.P., Murthy R., Thomson R.E.* Lagrangian measurements in Lake Ontario // *Lakes Res.* 1998. V. 24. P. 681–697.
29. *Peeters F.* Horizontale Mischung in Seen (Horizontal mixing in lakes) // Ph. D. Thesis. Zurich: Eidgenossische Technische Hochschule, 1994. 147 p.
30. *Peeters F., Wues A., Piepke G., Imbode D.* Horizontal mixing in lakes // *J. Geophys. Res. Oceans.* 1996. V. 101. P. 361–375.
31. *Pinton J.F., Sawford B.L.* Lagrangian view of turbulent dispersion and mixing. In *Ten Chapters in Turbulence* / Eds *P.A. Davidson, Y. Kaneda, K.R. Sreenivasan*. New York: Cambridge Univ. Press, 2012. P. 132–175.
32. Reference Manual “River Flow 2D Two-Dimensional River Dynamics Model”. Hydronia LLC. 2016. 21 p.
33. *Richardson L.F., Strommel H.* Note on eddy diffusion in the Sea // *J. Meteorol.* 1948. V. 5. P. 238–240.
34. *Shaha D., Cho Y.K., Kwak M.T., Kundu S., Jung K.* Spatial variation of the longitudinal dispersion coefficient in an estuary // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 3679–3688.
35. *Stocke R., Imberge J.* Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a medium-sized lake // *Limnol. Oceanogr.* 2003. V. 48 (3). P. 971–982.
36. *Strommel H.* Horisotal diffusion due to oceanic turbulence // *J. Marine Res.* 1949. V. 8. № 3. P. 199–225.
37. *Suara K., Mardani N., Fairweather H., McCallum A., Allan C., Roy S., Brown R.* Observation of the Dynamics and Horizontal Dispersion in a Shallow Intermittently Closed and Open Lake and Lagoon (ICOLL) // *Water*. 2018. V. 10 (6). 776. <https://doi.org/10.3390/w10060776>
38. *Suara K., Brown R., Borgas M.* Eddy diffusivity: A single dispersion analysis of high resolution drifters in a tidal shallow estuary. *Environ. // Fluid Mech.* 2016. V. 16. P. 923–943.