

уровнях, даже на 3 м. При этом определяющим фактором выступает снижение расходов притока воды по р. Каме.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 53-63. – DOI: 10.17076/Lim1419.
2. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А. Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124. – DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.1.9.
3. Лепихин А.П., Возняк А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамского-Березниковского промузла // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 560-566. – DOI: 10.31857/S0321059620050120.
4. Шайдулина А.А., Двинских С.А. Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – №. 3 (42). – С. 61-70. – DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70.
5. Куликов Г.И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Материалы всесоюзного совещания по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. – Пермь, 1959. – Вып. 2. – С. 1-13.
6. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 3-11. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.1.
7. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.2 (CPD-69) / Gary W. Brunner. – December 2022. – 464 p.

УДК 504.054; 504.064.3

DOI:10.7242/echo.2024.1.3

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ДРЕЙФОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

А.И. Лучников, Т.Н. Синцова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Малые и средние водохранилища широко используются в нашей стране для обеспечения питьевых, промышленных и сельскохозяйственных нужд. Анализ возможных последствий загрязнения таких водных объектов вследствие залповых выбросов или аварийных ситуаций требует оценки скоростей распространения поллютантов и в первую очередь поверхностных скоростей течений. Как правило, доминирующим фактором в формировании поверхностных течений выступают ветровые нагрузки. Использование БПЛА открывает новые возможности оценки скоростей на таких водных объектах в Лагранжевой постановке. Представлены результаты таких оценок на примере Верхне-Зырянского водохранилища, активно используемого для технического водоснабжения промышленными предприятиями г. Березники.

**Ключевые слова:** скорость дрейфового течения, скорость ветра, беспилотные летательные аппараты, водохранилище, водопользование.

## Введение

Для решения широкого круга задач, связанных с охраной и рациональным использованием водных объектов, необходимы оценка и задание характерных значений скоростей течений, соответствующих определенным комплексам гидрологических и метеорологических параметров.

Существуют два принципиально различных подхода к описанию гидродинамических процессов: Эйлера и Лагранжа. При подходе Эйлера измерение и описание строятся по некоторой фиксированной точке пространства, при подходе Лагранжа исследуется движение, перемещение некоторого маркера, при этом переменными во времени являются координаты такого маркера. Эти два подхода очень тесно связаны между собой, но в тоже время в зависимости от характера решаемой задачи, морфометрических и гидрологических особенностей рассматриваемых водных объектов их эффективность может очень существенно различаться.

## Постановка задачи

Механизм формирования течений также в значительной мере определяет методы и технологии способов оценки скоростей течений. Стоковые течения традиционно исследуются по технологии с подходами Эйлера. Если ставится задача измерения расходов воды на некотором бесприточном участке водотока, то использование подхода Эйлера является наиболее эффективным, и традиционные гидрометрические методы ориентированы на использование этого подхода. Традиционно измерения скоростных характеристик потока проводились с использованием различного типа гидрометрических вертушек [1], в настоящее время в измерителях скоростей течений используется широкий спектр физических процессов [2]. В то же время если ставится задача оценки распределения скоростей дрейфовых течений в целом по акватории водного объекта или его достаточно крупного участка, а также оценка коэффициентов горизонтальной диффузии, то подход Лагранжа становится единственно возможным. Такие задачи в первую очередь возникают при оценке зон распространения загрязнения при различных техногенных воздействиях.

Подход Лагранжа строится на основе оценки и последующего анализа перемещающихся в водном объекте маркеров, поэтому ключевое значение в данной технологии имеет способ эффективной фиксации их положения в процессе перемещения по акватории водного объекта. При этом могут использоваться как химические, так и физические маркеры. Выбор оптимальных параметров маркера должен решаться в едином комплексе с используемой системой отслеживания перемещения маркеров (ее возможностей). Традиционно в качестве маркеров наиболее часто используются различные типы поплавков [1, 4], а также фиксируемые изменения физических свойств воды (цвет, удельная электропроводность и т.д.).

Наиболее сложной задачей при исследованиях на основе подхода Лагранжа является эффективное обеспечение фиксации маркеров в пространстве и времени. Использование традиционных геодезических методов на достаточно крупных водных объектах весьма затруднено из-за малых значений углов заложений при фиксации положения маркеров с точки наблюдения, а на малых объектах (водотоках), где они могут быть эффективны, такие задачи не актуальны. Дистанционные методы на основе космоснимков не позволяют оперативно проводить требуемые оценки ввиду низкого разрешения, частоты обновления снимков и стоимости их приобретения. Однако в настоящее время открываются широкие возможности оценки скоростей течений по подходу Лагранжа благодаря развитию технологий на основе использования БПЛА. Первый определенный опыт применения данной технологии в гидрологии при обследовании состояния береговых полос дается в [3]. Применение БПЛА для решения таких специ-

фических задач, как оценка скоростей поверхностных течений и оценка коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии, рассматривается в [4].

Простейшей задачей, на решении которой эффективно можно проиллюстрировать возможности использования технологии БПЛА, является оценка скоростей дрейфовых течений. Согласно многочисленным экспериментальным данным и теоретическим оценкам [5-9], при решении практических задач, как правило, принимается линейное приближение зависимости скорости дрейфового течения ( $V$ ) от скорости ветра ( $W$ ), т.е.:

$$V = k_{\text{ветер}} \cdot W, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость дрейфового течения, м/с;  $k_{\text{ветер}}$  – ветровой коэффициент;  $W$  – скорость ветра, м/с.

При этом первые достаточно строгие оценки были получены в океанологии [5-9] с допущением, что ветер постоянен как по скорости, так и направлению, а водный объект имеет неограниченную глубину. Особое внимание было уделено оценке изменения направления течения с глубиной по отношению к направлению ветра вследствие эффекта Кориолиса. Данный эффект имеет принципиальное значение для больших глубоких водных объектов, а на небольших мелких водоемах он не может значимо проявляться. В тоже время на этих объектах (небольших, мелких водоемах) принципиальное значение имеют такие характеристики, как морфометрия, вертикальная плотностная стратификация, температура воздуха и воды, пространственная и временная изменчивость ветра.

Как показывают многочисленные экспериментальные данные, полученные на различных водных объектах, наблюдается очень широкий диапазон изменения ветрового коэффициента  $0,008 \leq k_{\text{ветер}} \leq 0,06$  [5, 7-9] при задании параметров  $V$  и  $W$  одной размерности. В чем причина такого широко разброса значений коэффициентов  $k_{\text{ветер}}$  для относительно небольших однородных по морфометрическим характеристикам водных объектов?

В [10, 11] на основе достаточно строгого анализа формирования дрейфовых течений в водных объектах было показано, что ветровой коэффициент в соотношении (1) определяется следующим комплексом параметров:

$$k_{\text{ветер}} = \frac{\mu_a}{\mu_w} * \frac{\delta_w}{\delta_a}, \quad (2)$$

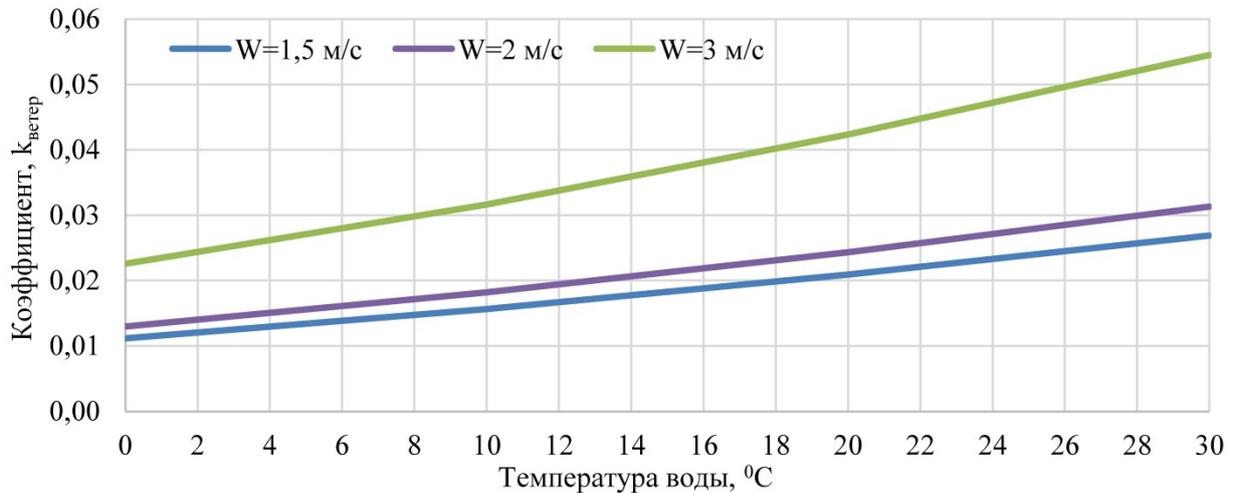
где  $\mu_w$ ,  $\mu_a$  – коэффициенты динамической вязкости, соответственно, воды и воздуха;  $\delta_w$ ,  $\delta_a$  – толщина вязкого ламинарного подслоя, соответственно, для воды и воздуха.

Учитывая, что динамическая вязкость воды при повышении ее температуры снижается значительно сильнее, чем динамическая вязкость воздуха, отношение  $\frac{\mu_{\text{воздух}}}{\mu_{\text{вода}}}$  должно существенно возрастет с увеличением температуры. В то же время, как показано в работах [10, 11], величины параметров  $\delta_w$ ,  $\delta_a$  определяются скоростью ветра. При этом, как показано в [10], при скорости ветра  $W = 1$  м/с отношение  $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 1,16$ , при  $W = 2$  м/с  $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 1,35$ , а при  $W \geq 3$  м/с  $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 2,35$ .

Таким образом, при оценке ветрового коэффициента  $k_{\text{ветер}}$  определяющими параметрами выступают в первую очередь температура воды и скорость ветра.

Поскольку натурные измерения могут выполняться в значительных диапазонах значений температуры воды и скоростей ветра, данные факторы достаточно хорошо объясняют наблюдаемый широкий диапазон экспериментальных оценок коэффициента  $k_{\text{ветер}}$ . Для удобства оценки данного коэффициента на рис. 1 представлена его

зависимость от температуры при различных скоростях ветра. Так как динамическая вязкость воздуха не очень существенно изменяется в зависимости от температуры, то ее значение принимается при температуре воздуха, соответствующей температуре воды.



**Рис. 1.** График изменения  $k_{\text{ветер}}$  в зависимости от температуры воды при различных скоростях ветра

Как следует из рис. 1, значения данного коэффициента при температуре воды и воздуха  $25^{\circ}\text{C}$  более чем в 2 раза больше, чем при  $5^{\circ}\text{C}$ .

Данные оценки были получены на лабораторных установках для некоторых модельных условий. В связи с этим принципиальный интерес представляет оценка эффективности этих соотношений на конкретных водных объектах.

### Материалы и методы

Отработка технологии оценки скоростей дрейфовых течений с использованием БПЛА была проведена на акватории Верхне-Зырянского водохранилища, которое является важным источником технического водоснабжения предприятий г. Березники. Его морфометрические и гидрологические характеристики даны в [4, 12].

При проведении натурных экспериментов предварительно на акватории Верхне-Зырянского водохранилища было закреплено 8 контрольных буйев из сверхлегких плавучих материалов (экструзионный пенополистирол) в виде ярких квадратных планшетов  $0,6 \times 0,6$  м. Для стабилизации их положения на акватории и минимизации влияния ветра каждый буй закреплялся на 3 разнонаправленных ( $\sim 110-130^{\circ}$ ) растяжки. Размеры, форма и цвет поплавков (маркеров) был выбран так, чтобы обеспечивалось их безошибочное обнаружение на фотографиях с БПЛА при высоте съемки до 400 м. Плановые координаты буйев были определены с помощью ГНСС-приемника в режиме RTK от сети постоянно действующих референчных базовых станций.

В качестве поплавков использовались круглые планшеты диаметром  $\sim 0,6$  м (OSB-плита), окрашенные в различные цвета (8 шт.).

Для фиксации параметров метеорологических условий использовалась портативная метеостанция Kestrel, позволяющая в автоматическом режиме записывать данные наблюдений с осреднением в 1 минуту. Установка метеостанции выполнена на одном из центральных буйев на треноге, на высоте 0,5 м от поверхности воды.

Аэрофотосъемка выполнялась с помощью квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro (2 комплекта) с дополнительными АКБ и возможностью их зарядки в полевых условиях.

По завершению подготовительных работ осуществлялся взлет, позиционирование и зависание квадрокоптера над центром акватории в месте планируемого спуска поплавков. Фотофиксация осуществлялась с наклоном камеры в надир (угол съемки  $90^\circ$ ) с интервалом 1 минута. Параллельно выполнялись работы по спуску поплавков на акваторию с плавсредства (с наветренного борта). Далее каждые 18-20 минут на высоту зависания «снимающего» квадрокоптера выводился второй БПЛА. Выполнялось его позиционирование, настройка камеры и перевод в режим интервальной съемки. Только после этого первый квадрокоптер возвращался на точку взлета для замены аккумуляторной батареи. Общее время эксперимента составило 280 минут.

За время эксперимента выполнено 3 цикла наблюдений при различных метеорологических условиях. Стартовая зона поплавков (место спуска) была единой для всех 3-х запусков. Непрерывное время интервальной съемки 3-х циклов составило 248 минут. Средняя температура воды в поверхностном слое составила  $25^\circ\text{C}$ .

### Обработка материалов и расчеты

Все фотоматериалы на начальном этапе обработки поочередно были точно ориентированы и масштабированы в пространстве по фактическим координатам буюв и их отображению на снимках в программной среде ГИС «ArcMap» в единой системе координат (WGS 1984 / UTM Zone 40N). Пространственное разрешение фотоснимков позволяло безошибочно дешифровать каждый поплавок и фиксировать точку его центра. Далее была проведена оцифровка местоположений поплавков со всех снимков и вычислены их плановые координаты для каждого момента времени фотофиксации. Основные параметры метеорологических условий (скорость и направление ветра) были импортированы и представлены в табличной форме. В результате обработки сформированы 3 блока данных с плановыми координатами для 8 поплавков за 78, 110 и 60 минут. В плановом виде фиксированное перемещение поплавков при проведении натуральных экспериментов представлено на рисунке 2.

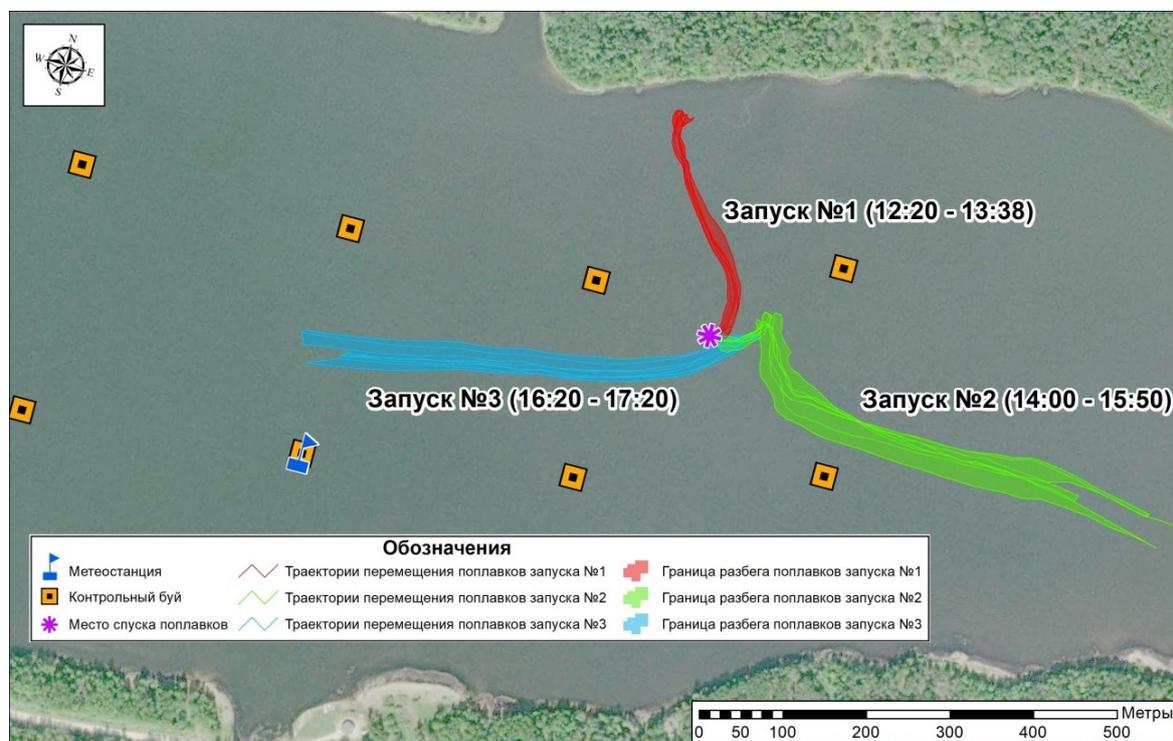


Рис. 2. Картосхема перемещений поплавков по результатам обработки 3 циклов наблюдений

### Обсуждение результатов эксперимента

Как следует из анализа хронологических графиков перемещения маркеров, представленных на рис. 3, в первые 10 минут наблюдений из-за инерционности рассматриваемого процесса отсутствуют связи между направлением ветра и направлением перемещения поплавков. При этом продолжительность данного адаптационного периода зависит от скорости ветра. При достаточно резком усилении ветра до 3-6 м/с уже за первый 6-минутный интервал происходит синхронизация перемещения поплавков с направлением ветра.

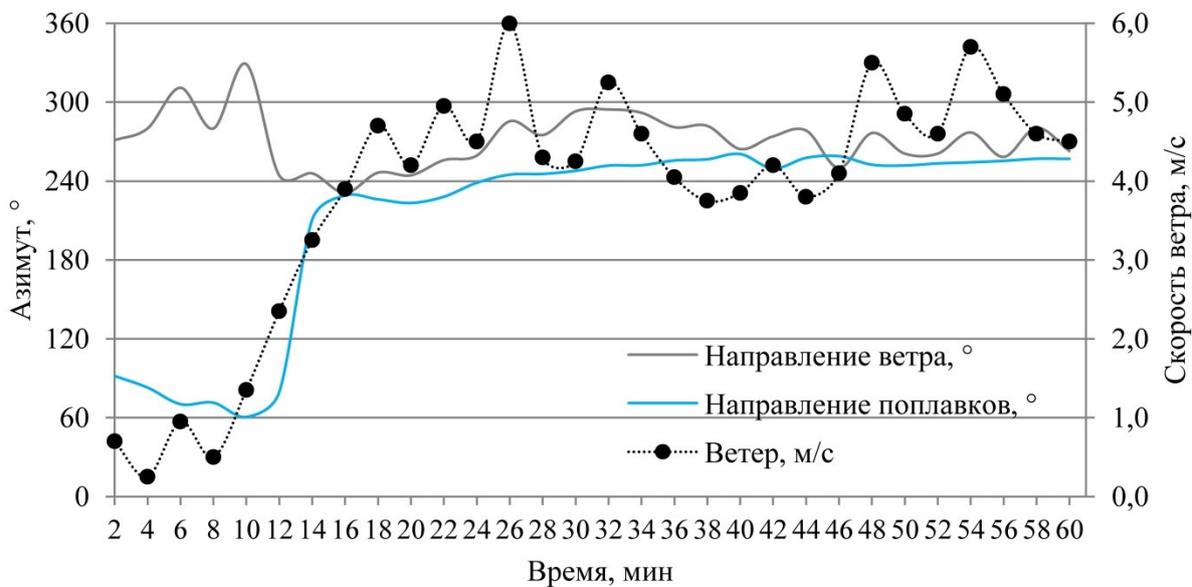


Рис. 3. Хронологические графики изменения скорости ветра и скорости перемещения поверхностных поплавков

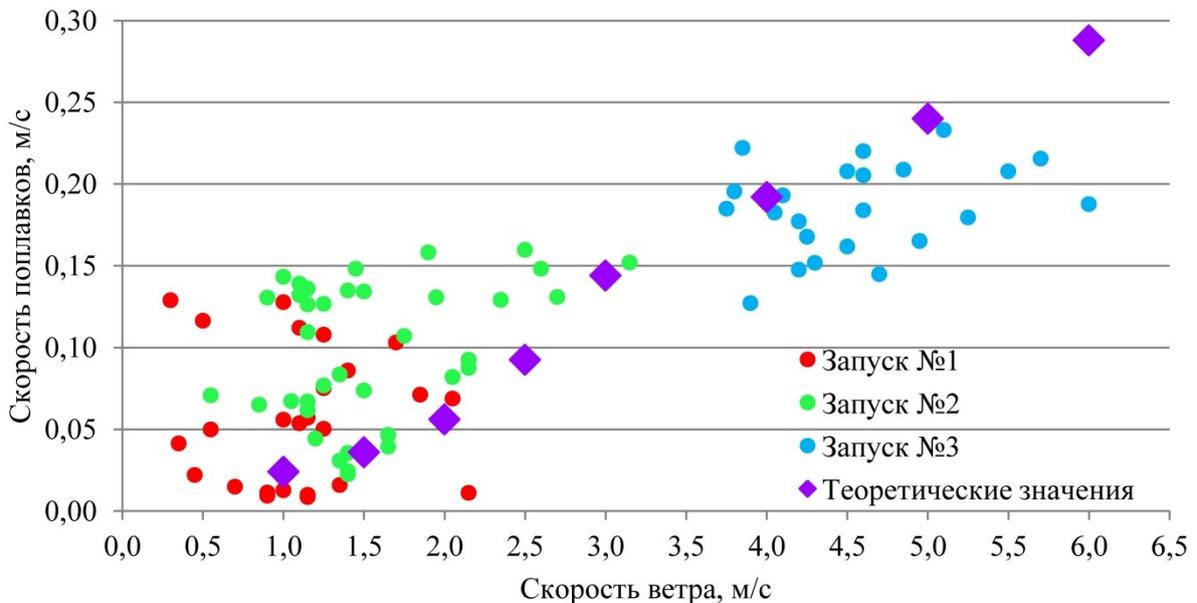


Рис. 4. График связи рассчитанных скоростей перемещения поплавков и скорости ветра по результатам 3-х запусков (теоретические значения определены для температуры воды 25°С)

На основе обработки всех 3-х циклов наблюдений построен результирующий график (рис. 4), отражающий связи рассчитанных скоростей перемещения поплав-

ков и скорости ветра, а также теоретические значения по (1, 2). Из рис. 4 можно предположить, что на не крупных водных объектах при слабых скоростях ветра (менее 1-1,5 м/с) ветровые нагрузки перестают быть доминирующим фактором, определяющим скорость и направление поверхностных течений. При слабых ветровых нагрузках существенную роль играют другие механизмы, и на первый план выходят стоковые течения, а при скоростях ветра более 3 м/с ветровые нагрузки начинают играть доминирующую роль в формировании поверхностных течений в рассматриваемом водном объекте.

Данный эффект достаточно наглядно демонстрируется на рис. 4. При скоростях ветра менее 2 м/с практически отсутствует корреляционная связь между скоростью ветра и скоростью перемещения поплавков (коэффициент корреляции составляет  $R_{w,v} < 0,1$ ), при этом теоретические оценки по соотношениям (1, 2) отражают минимальные скорости перемещения. При скоростях ветра более 3 м/с ветровые нагрузки становятся доминирующим фактором, определяющим дрейфовые течения (коэффициент корреляции  $R_{w,v} \sim 0,5$ ). При этом оценки, полученные по соотношениям (1, 2), определяют верхнюю границу скоростей перемещения поплавков при данных скоростях ветра.

### Заключение

Результаты проведенного эксперимента показывают адекватность предложенного метода использования БПЛА при оценке скоростей дрейфовых течений в поверхностных водных объектах. При этом необходимо учитывать, что при малых скоростях ветра ветровые нагрузки перестают быть определяющим фактором при формировании поверхностных течений. Только при скоростях ветра более 3 м/с дрейфовые течения становятся доминирующими. Данные оценки имеют принципиальное существенное значение для оперативной оценки устойчивости функционирования систем водоснабжения в безледоставный период при различных возможных аварийных и чрезвычайных ситуациях.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 384 с.
2. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 5. – С. 639-648.
3. Телегин В.А., Горбачкий В.В., Зацепин А.Г., Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Сильвестрова К.П., Баранов В.И., Куклев С.Б., Дудко Д.И., Шпилев Н.Н. Сравнение течений по данным КВ и СВЧ радиолокаторов с данными ADCP и дрейфтеров на гидрофизическом полигоне в Геленджике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: четырнадцатая Всерос. открытая конф.: электрон. сб. тез. и докл. / ИКИ РАН. – М., 2016. – С. 293.
4. Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 1. – С. 37-46.
5. Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Лучников А.И. Опыт применения БПЛА для оценки коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии на небольших водных объектах // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50, № 2. – С. 139-149. – DOI: 10.31857/S0321059623020116.
6. Карасева Г.Г. Волны, течения и водные массы водоемов: конспект лекций / под ред. Б.Б. Богословского. – Л.: ЛПИ, 1980. – 57 с.: ил.

7. Филатов Н.Н. Динамика озёр. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 166 с.: ил.
8. Csanady G.T. «Pycnobathic» Currents over the Upper Continental Slope // Journal of Physical Oceanography. – 1985. – № 15. – P. 306-315/.
9. Banner M.L., Melville W.K. On the separation of air flow over water waves // Journal of Fluid Mechanics. – 1976. – V. 77, № 4. – P. 825-842.
10. Kawamura H., Toba Y. Ordered motion in the turbulent boundary layer over wind waves // Journal of Fluid Mechanics. – 1988. – V. 197. – P. 105-138.
11. Иванова И.Н., Ильгисонис И.В., Мельникова О.Н., Показеев К.В. Дрейфовое течение на гладкой и взволнованной поверхности воды // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2006. – № 3. – С. 64-67.
12. Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рожновская А.А. Торможение дрейфового течения на склонах ветровых волн в зоне усиления // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2013. – № 4. – С. 55-58.
13. Мирошниченко С.А., Богомоллов А.В., Возняк А.А., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С. Современные особенности гидрохимического режима Верхне-Зырянского водохранилища – источника технического водоснабжения калийных предприятий БКПРУ-2, 4 // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 15-24. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.4.

УДК 551.435.84(470.620)

DOI:10.7242/echo.2024.1.4

## ПОДЗЕМНЫЕ ПОЛОСТИ У ТУРЕЦКОЙ КРЕПОСТИ НА РЕКЕ БАКАНКА В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

М.Ю. Сохин

*Русское общество спелестологических исследований, Москва*

**Аннотация:** В 2015-17 гг. МОО «Русское общество спелестологических исследований» (РОСИ) на территории Крымского района Краснодарского края проводила работы по поиску и обследованию подземных полостей с целью оценки их пригодности для экскурсионной деятельности.

Территория Турецкой крепости расположена на крутом мысе, образованном слиянием рек Баканка и Колхозка, к востоку от станицы Нижнебаканская. Пласт сильно корродированного плотного известняка обнажается в 2-х м ниже края обрыва, на высоте 60 м выше уровня рек. В этом обнажении имеются многочисленные навесы и гроты. В западной части обнажения была исследована труднодоступная естественная пещера длиной около 12 м. В 200 метрах от неё находится разведочная штольня длиной 14 метров.

**Ключевые слова:** гроты, пещера, подземные каменоломни, разведочная штольня, известняк, подземная разработка, ров, карьер.

В 2015-17 гг. МОО «Русское общество спелестологических исследований» (РОСИ) в сотрудничестве с Краснодарской краевой общественной организацией «Содействие возрождению села» на территории Крымского района Краснодарского края проводила работы по поиску и обследованию пещер и старых подземных выработок с целью оценки их пригодности для экскурсионной деятельности. В 2015 г. основное внимание было уделено исследованию подземной каменоломни конца XIX – начала XX веков, расположенной на южной окраине поселка Саук-Дере [1]. В последующие годы в результате опроса местных жителей обнаружены и исследованы подземные выработки, часть которых отнесена к подземным фортификационным сооружениям немецкой «Голубой линии» [2]. Один из участков работ, где проводились исследования, располагался к востоку от станицы Нижнебаканская на р. Баканка.

В геоморфологическом отношении район работ приурочен к зоне предгорий и средневысоких гор северо-западного погружения оконечности Кавказского хребта. Его территория представляет собой предгорную наклонную террасированную равнину, рассе-