

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 556.5.07

DOI:10.7242/echo.2022.2.1

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В 3D-ПОСТАНОВКЕ

Ю.С. Ляхин, А.В. Богомолов  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Рассмотрены методы и подходы получения различных характеристик водных объектов, необходимых при создании и последующей верификации модельных гидродинамических расчетов в трехмерной постановке. На примере участка слияния рек Кама и Вишера представлены результаты измерений гидрографических характеристик с помощью промерных эхолотов, границ водного объекта с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), динамических параметров водотока, получаемых при использовании гидроакустических доплеровских профилографов течений. Сформулированы выводы о влиянии определяемых (измеряемых) параметров на качество создаваемых моделей и результаты расчетов.

**Ключевые слова:** гидродинамическое моделирование, водный объект, исходные данные, верификация моделей, методы измерений.

### Введение

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом, гидродинамические модели являются важным инструментом для решения широкого круга водохозяйственных задач. Достаточно широкое распространение, ввиду своей «доступности» (открытости) и относительно невысокой технической требовательности, получили одно- и двухмерные математические модели. При этом квалифицированное их использование позволяет успешно решать весьма сложные прикладные задачи. Гораздо более сложным и трудоемким во всех смыслах является процесс построения гидродинамической модели в трехмерной постановке и последующий расчет в задаваемых условиях. Но здесь следует отметить, что только такие модели позволяют получать качественные результаты в условиях существования плотностных стратификаций (температурных, химических) в водных объектах, при слиянии рек с разными химическими и динамическими характеристиками, при сложной морфометрии водотоков и водоемов и др. [1-4]. Поэтому корректность и обоснованность применения гидродинамических моделей, тем более в 3D-постановке, требует детального, комплексного задания исходных данных. Необходимый объем и качество исходной информации могут быть получены только при использовании современных измерительных комплексов. На примере участка слияния рек Кама и Вишера будут детально рассмотрены аспекты получения различных исходных параметров, необходимых для построения трехмерной гидродинамической модели.

### Материалы и методы

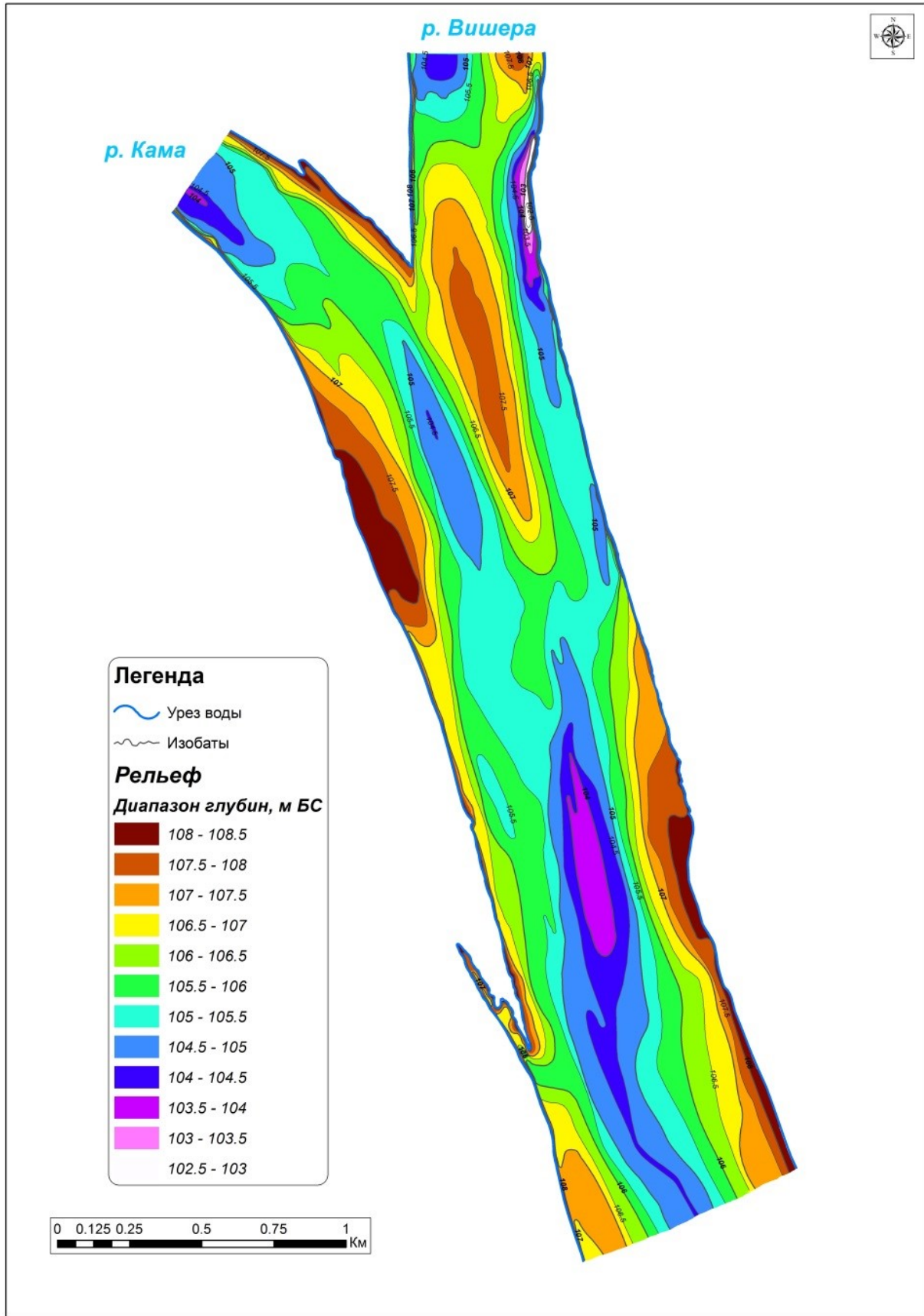
Участок исследования протяженностью около 3 км и шириной около 0,8 км располагается на севере Пермского края, в 210 км от г. Перми, в границах Соликамского городского округа. Он представляет собой место слияния рек Кама и Вишера (левый приток р. Камы), имеющих не только разные гидродинамические и морфометрические характеристики в устьевых зонах, но и обладающих разным гидрохимическим составом, что обуславливает и различную плотность вод рассматриваемых водотоков (рис. 1).

Поэтому моделирование процессов, наблюдаемых при слиянии данных водотоков, возможно только с использованием моделей в 3D-постановке. Использование таких программных инструментов подразумевает применение определенного набора и качества исходных данных не только на стадии построения гидродинамической модели участка, но и при последующей ее верификации. К таким параметрам в данном конкретном случае относятся: морфометрические характеристики дна и береговой зоны реки (необходимые для расчетов зон затопления); гидродинамические и гидравлические параметры водотока (скорости, направления течений, уклоны водной поверхности) на «входных» и «закрывающих» створах; рассчитанные на основе натуральных измерений коэффициенты шероховатости; плотность воды водотоков; метеорологические характеристики и ряд других параметров.



**Рис. 1.** Общий вид участка исследований

Важнейшим аспектом при построении гидродинамических моделей, особенно в 3D-постановке, является наличие качественной топографической основы. На водных объектах она строится посредством проведения гидрографических работ соответствующего масштаба с использованием современных промерных комплексов. Как показывает опыт проведенных исследований, оптимальным с точки зрения трудозатрат и последующего построения адаптивных расчетных сеток является применение однолучевых промерных эхолотов, совмещенных с системами спутникового позиционирования. Промерные работы выполняются согласно требований действующих СП [5] для масштаба 1:2000 и 1:5000. При выборе масштаба следует также учитывать и сложность (пересеченность) рельефа. В отдельных случаях масштаб может быть укрупнен до 1:1000 или 1:500. Последующее построение цифровой модели рельефа (ЦМР) по результатам промерных работ должно осуществляться с сечением рельефа не более 0,5 м (рис. 2).



**Рис. 2.** Рельеф дна (в Балтийской системе высот) на участке исследований по результатам батиметрической съемки от 13.08.2019 г.

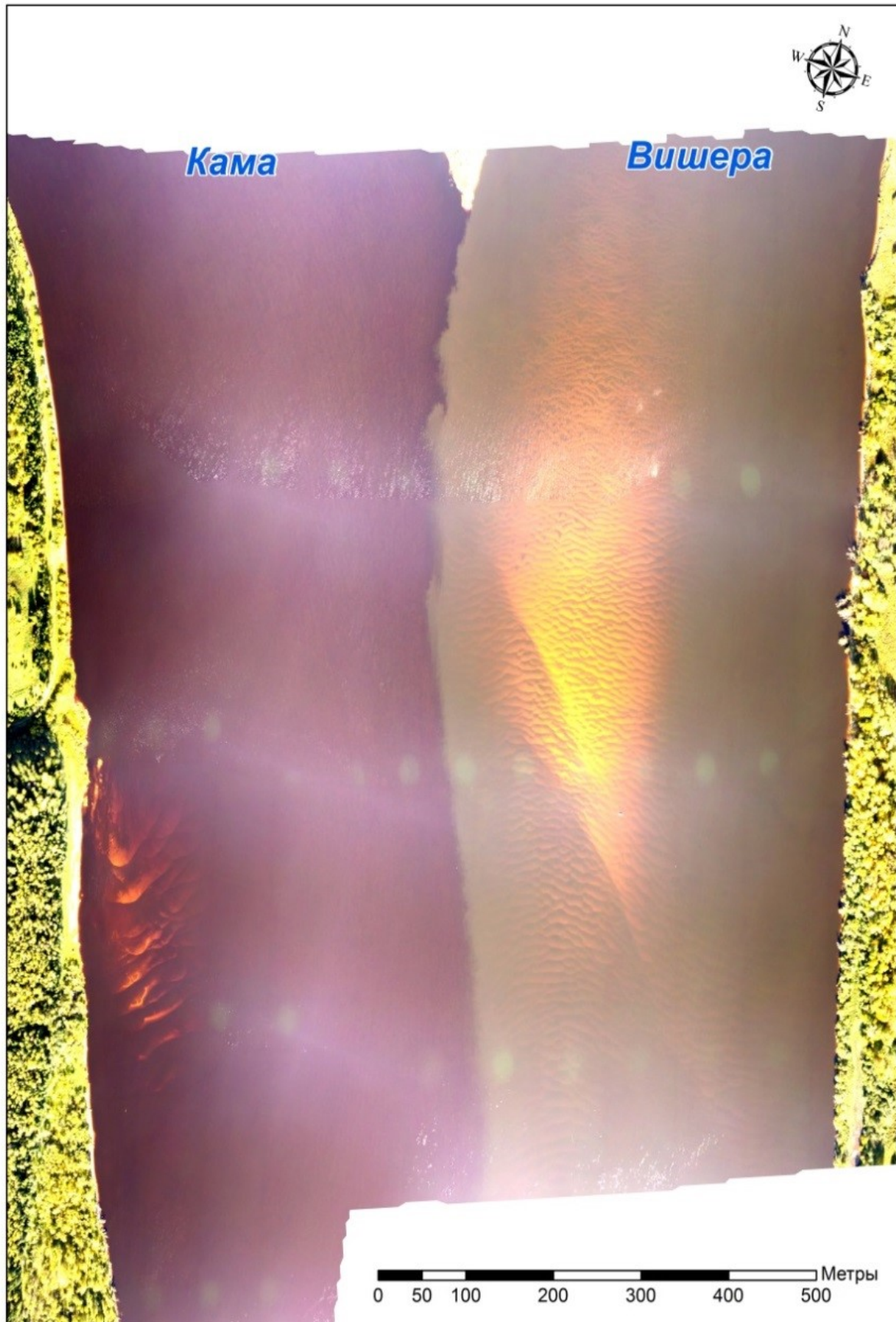
Представленный на рисунке 2 рельеф дна рек Кама и Вишера был получен посредством производства гидрографических работ промерным эхолот SyQwest S/C Hydrobox 210khz. Камеральная обработка выполнялась в геоинформационной системе ArcGIS. Применение прогрессивных систем позиционирования позволяет не только осуществлять более точную плановую привязку измерений (как правило ~ 10 см), но и на всем участке исследований обеспечивать высотное позиционирование, необходимое для получения уклонов водной поверхности, значения которых используются впоследствии при определении коэффициентов шероховатости русла.

Детальность построения ЦМР и, соответственно, расчетной сетки зависит также от подробности определения местоположения уреза воды. Одним из наиболее распространенных и современных методов является оцифровка ортофотопланов, полученных с применением малых БПЛА, которые широко используются в настоящее время при решении различных водохозяйственных задач [6-8]. Проводя автоматическое пилотирование на высоте 100-500 м с использованием распространенных и доступных БПЛА можно получить ортофотопланы участка с разрешением ~ 5-10 см/пикс, что является достаточным для получения детальной и высококачественной ЦМР (рис. 3).

Следует учитывать, что получаемый при использовании данного оборудования и методов материал имеет также ценность с точки зрения визуализации и анализа процессов образования микро- и мезоформ рельефа, процесса перемешивания водных масс с различными гидрохимическими особенностями, формирования гидродинамических структур и др. Отмеченные аспекты могут быть использованы в дальнейшем при анализе качества верификационных расчетов построенной гидродинамической модели.

Следующим важным аспектом при построении трехмерной гидродинамической модели является задание исходных динамических параметров водотоков. Для максимального учета особенностей и воспроизводства структуры течения по всему живому сечению недостаточно оперировать средними скоростями потока. Необходимо указывать (назначать) характерные скорости для отдельных частей сечения исследуемого потока. Только в этом случае удастся максимально учесть условия в зоне слияния двух рек. Поэтому использование наиболее распространенного метода с применением гидрометрических вертушек бывает недостаточным, при этом процесс измерений становится очень трудоемким. Наиболее целесообразным и подходящим в данном случае является использование метода измерений с помощью акустических доплеровских профилографов течений [9]. Эти измерения проводятся в нескольких створах на исследуемом участке. Верхний («входной») створ, как уже отмечалось, используется для задания параметров в сечении «втекающего» потока. Результаты измерений в нижних створах необходимы для верификационных расчетов и адаптации модели. Расположение створов представлено на рис. 4.

В качестве основного прибора при выполнении исследований применялся акустический доплеровский профилограф течения (ADCP) Workhorse Rio Grande 600kHz. Через соответствующие порты и протоколы производилось его подключение к системе спутникового позиционирования, в качестве которой были выбраны двухчастотные GPS-ГЛОНАСС приемники Торсон GR-5, которые позволяют выполнять плановую и высотную привязку производимых измерений. Для управления профилографом, просмотра и обработки результатов использовался защищенный ноутбук Panasonic CF-30 с программным обеспечением «WinRiver II». Результаты измерений представлены на рисунках 5 и 6. На рисунке 5 представлены распределения скоростей и направлений потока по сечению реки Камы выше слияния с рекой Вишерой. На рисунке 6 представлены эти же характеристики в створе, расположенном ниже слияния двух исследуемых водотоков.



**Рис. 3.** Фрагмент ортофотоплана участка слияния рр. Кама и Вишера, полученного с помощью малого БПЛА (DJI Phantom 4)

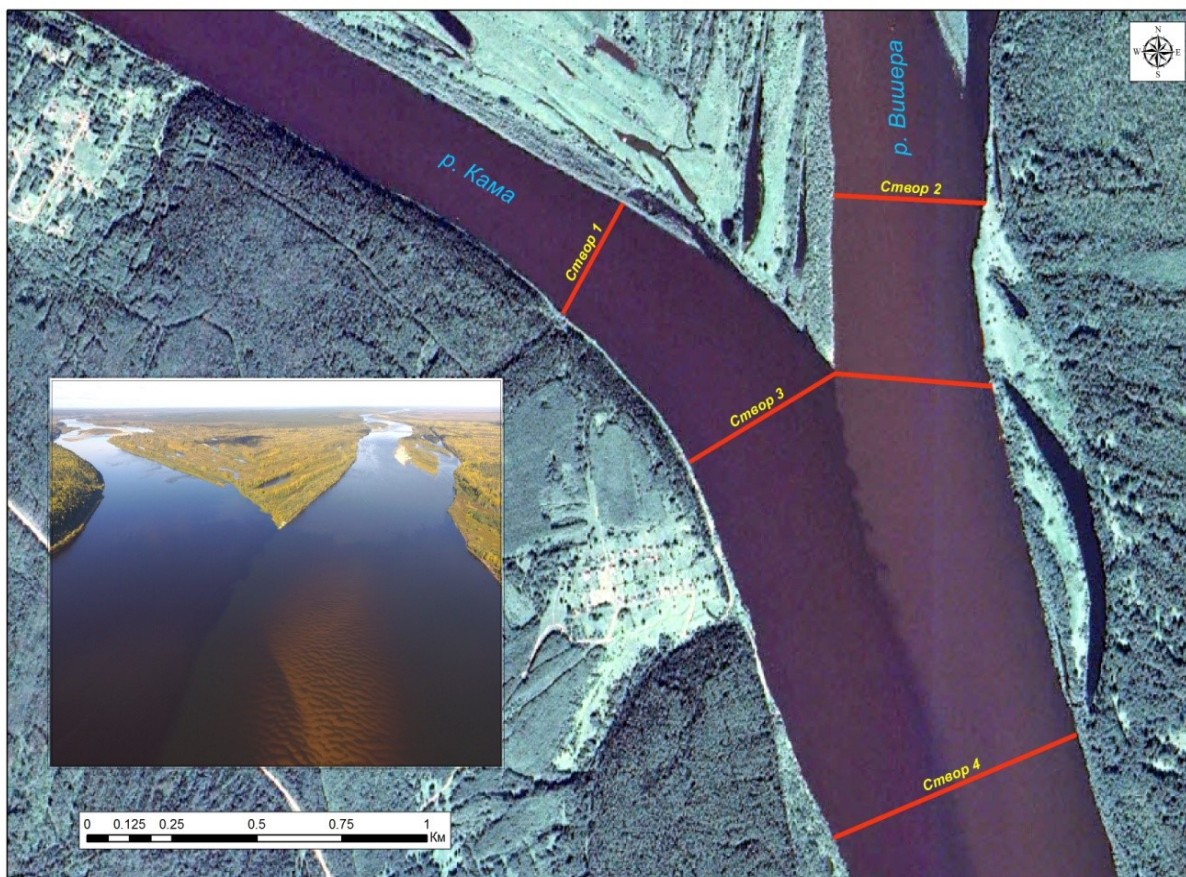


Рис. 4. Схема расположения створов измерения расходов воды на участке исследований

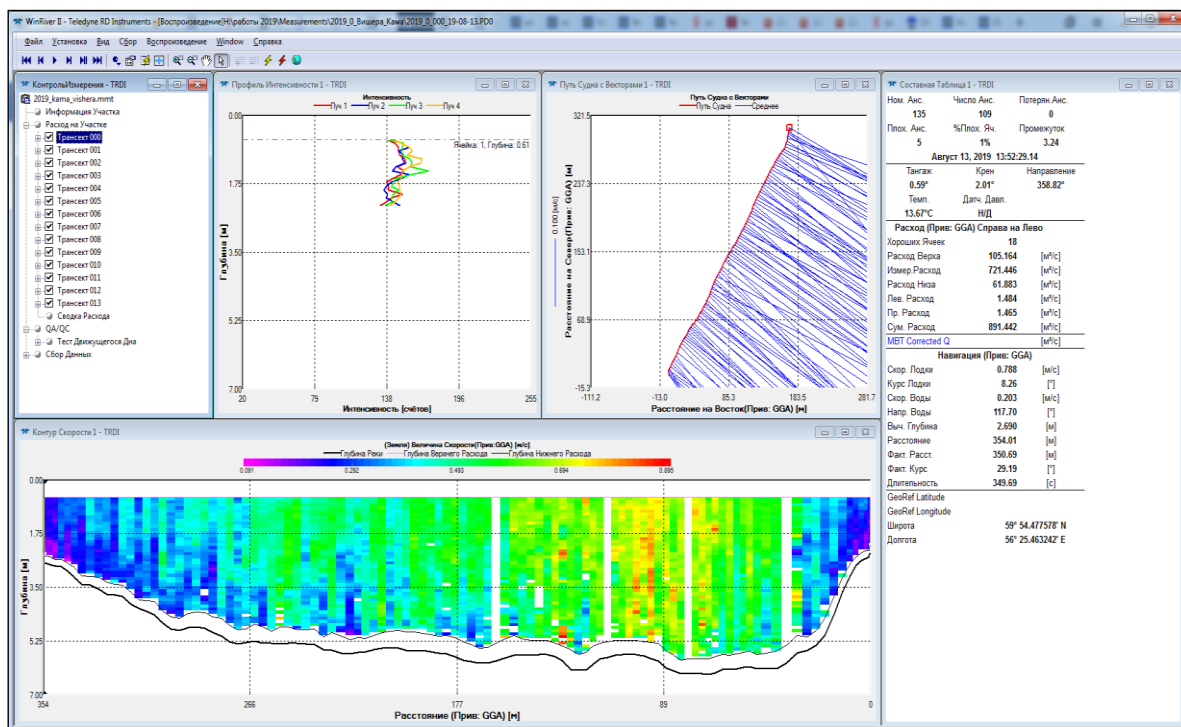


Рис. 5. Отображение результатов измерения расхода воды в 1-м створе (программное окно WinRiver II)

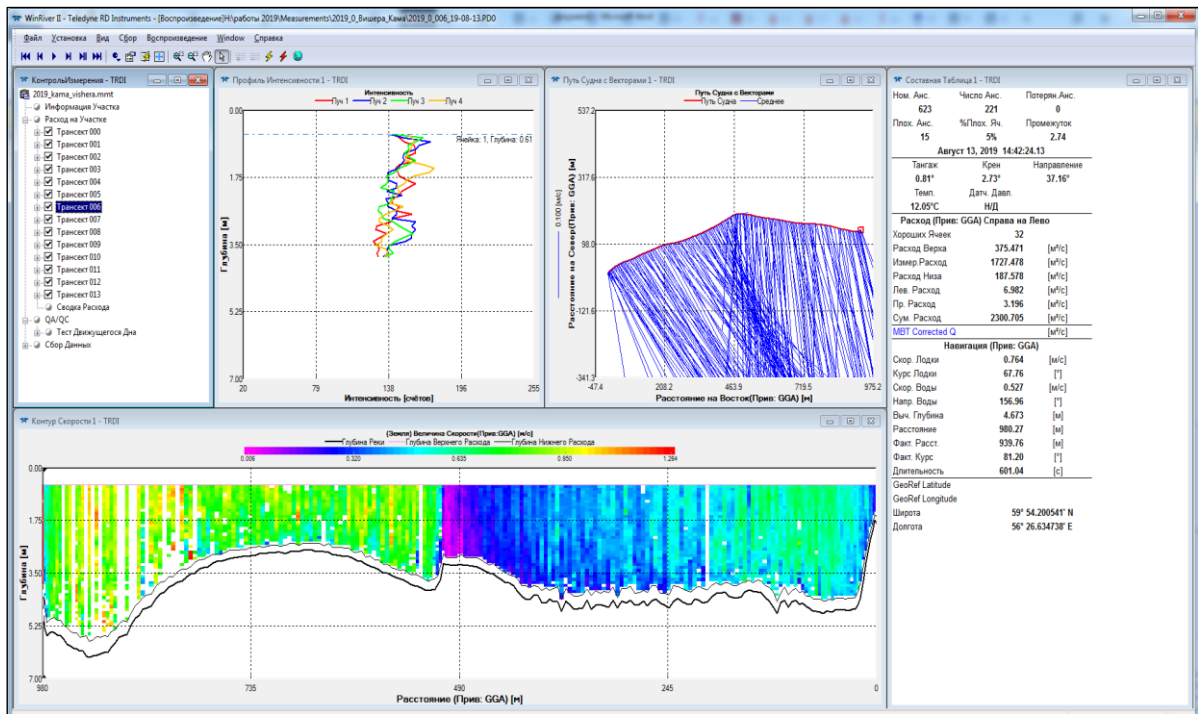


Рис. 6. Отображение результатов измерения расхода воды в 3-м створе (программное окно WinRiver II)

### Заключение

Выполненный комплекс исследований показал, что использование в качестве расчетного инструмента гидродинамических моделей, особенно в трехмерной постановке, требует задания высокоточных, детальных характеристик водных объектов. Это прежде всего динамические и морфометрические характеристики водотоков. Необходимость получения этих материалов связана с использованием современных технологий в области инженерных изысканий: беспилотные летательные аппараты, системы спутникового позиционирования, доплеровские акустические профилографы, промерные эхолоты. Лишь в случае верного задания исходных данных для водных объектов, особенно в сложных условиях – наличие вертикальных и горизонтальных неоднородностей водных масс, определяемых физическими и химическими свойствами – гидродинамические модели могут стать рабочим инструментом, позволяющим принимать верные управленческие решения для задач водного хозяйства.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ  
(р\_НОЦ\_Пермский край № 20-45-596028).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Гуалтьери К., Лэйн С.Н., Ру Б. Влияние гидродинамических режимов на смешение вод сливающихся рек // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 354-361. DOI: 10.7242/1999-6691/2018.11.3.26.
2. Horna-Munoz D., Constantinescu G., Rhoads B., Lewis Q., Sukhodolov A. Density effects at a concordant bed natural river confluence // Water Resources Research. – 2020. – V. 56, № 4. – номер статьи e2019WR026217. – DOI:10.1029/2019WR026217.
3. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Колчанов В.Ю., Gualtieri Carlo., Lane Stuart Nicholas. Roux Bernard Гидродинамические аспекты слияния рек с различными плотностями вод // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020 – Т. 13, № 4. – С. 381-392. – DOI: 10/7242/1999-6691/2020.13.3.29.

4. Bahmanpouri F., Filizola N., Ianniruberto M., Gualtieri C. A new methodology for presenting hydrodynamics data from a large river confluence // XXXVII IAHN Congress. At: Kuala Lumpur, Malaysia. – 2017. – V. 37.
5. СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Ч. III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Госстрой России. 2004. – 10 с.
6. 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. – DOI: 10.25296/1997-8669-2021-15-1-58-66.
7. 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.
8. Косолапов А.Е., Скрипка Г.И., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Филатов А.А. Исследование морфологических и морфометрических особенностей берегов Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов и ГИС-технологий // Аридные экосистемы. – 2018. – Т. 24, № 3 (76). – С. 36-42.
9. РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande»: утв. Росгидромет, 01.08.2012. – СПб: ФГБУ «ГТИ», 2012. – 84 с.

УДК 561:551.736

DOI:10.7242/echo.2022.2.2

**ОРГАНОГРАФИЯ ГИНКГОФИТА  
*PSYGMOPHYLLUM EXPANSUM* (BRONGNIART) SCHIMPER  
ИЗ НИЖНЕЙ ПЕРМИ ПРИУРАЛЬЯ ПО МАТЕРИАЛАМ КОЛЛЕКЦИИ  
КУНГУРСКОГО СТАЦИОНАРА ГОРНОГО ИНСТИТУТА УРО РАН**

С.В. Наугольных<sup>1</sup>, Д.В. Наумкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В статье представлена характеристика монотопной выборки отпечатков ископаемого вида *Psugmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper, собранных в местонахождении Мазуевка (Кишертский район, Пермский край). Этот вид давно известен и чрезвычайно характерен для ископаемой пермской флоры Приуралья. Тем не менее, его систематическое положение, как и органография, нуждаются в дальнейшем уточнении и описаниях на основе вновь полученных материалов. Выборка листьев, отнесенных к *Psugmophyllum expansum* и описанных в настоящей работе, представляет собой три отпечатка листьев (возможно, филлокладиев), находящихся на разных стадиях онтогенеза, два из которых размещаются на одном образце. Приводятся данные о прижизненном сочетании листьев *Psugmophyllum expansum* с другими органами гинкгофитов, описанными ранее; на этой основе выполнена графическая реконструкция. Выборка хранится в фондах музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН.

**Ключевые слова:** *Psugmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper, гинкгофит, листовая пластинка, базальная лопасть, Мазуевка, музей карста и спелеологии.

### Введение

В пермских отложениях Среднего Приуралья и соседних регионов встречаются окаменелости, которые могут служить своего рода «визитными карточками» палеонтологии Пермского края. К числу таких геолого-палеонтологических «визитных карточек» или даже пермских брендов вполне заслуженно могут быть отнесены листья рода *Psugmophyllum* Schimper emend. Saporta.

Роду *Psugmophyllum* посвящена весьма обширная палеоботаническая литература [1-16]. В этих работах подробно рассмотрены вопросы, касающиеся номенклатуры родового названия *Psugmophyllum* [8], истории изучения *Psugmophyllum* и близких родов