



# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДЫ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ТРУДЫ

**IV**

ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

МОСКВА



15–18 СЕНТЯБРЯ



2015 ГОД

ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ОНЗ РАН "ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СУШИ"  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ МИНИСТЕРСТВА  
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РФ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# ФУНДАМЕНТ ВОДЫ

Труды Четвертой  
Всероссийской научной конференции  
с международным участием

15–18 сентября 2015 года

УДК 556.01:556.1:556.3:556.5

Ф-94

**Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов:** Труды Четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. / ИВП РАН: отв. ред. Болгов М.В. – Москва: ИВП РАН, 2015. – 560 с.

В сборник вошли материалы четвертой конференции по фундаментальным проблемам воды и водных ресурсов, прошедшей в г. Москве 15–18 сентября 2015 г.

Сборник предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов, специализирующихся в области фундаментальных проблем гидрологии, гидрофизики, гидрохимии и экологии поверхностных и подземных вод, а также в области водопользования и управления водохозяйственными системами.

**Fundamental Problems of Water and Water resources: Proceedings of IV Russian Scientific Conference – Moscow: Water Problems Institute RAS, 2015. – 560 p.**

The proceedings include the papers of proceedings of scientific conference on fundamental problems of water and water resources, which was held on 15–18 September in Moscow. The book will be useful for specialists in the field of hydrology, hydrophysics, hydrochemistry, limnology and ecology, as well as in the field of water use and water management.

**РЕДАКЦИОННАЯ ГРУППА:**

Д.т.н. Болгов М.В. – ответственный редактор

Д.г.н. Коронкевич Н.И. (ИГ РАН, Москва), д.ф.-м.н. Веницианов Е.В. (ИВП РАН, Москва),  
д.г.н. Винокуров Ю.И. (ИВЭП СО РАН, Барнаул), д.г.н. Георгиевский В.Ю. (ГТИ, Санкт-Петербург),  
д.г.н. Корытный Л.М. (ИГ СО РАН, Иркутск), д.г.н. Лепихин А.П. (ГИ УРО РАН, Пермь),  
д.г.-м.н. Поздняков С.П. (МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва),  
д.г.-м.н. Зекцер И.С. (ИВП РАН, Москва), д.ф.-м.н. Кучмент Л.С. (ИВП РАН, Москва),  
д.ф.-м.н. Зырянов В.Н. (ИВП РАН, Москва), д.г.н. Новикова Н.М. (ИВП РАН, Москва),  
д.г.н. Кузьмина Ж.В. (ИВП РАН, Москва), к.т.н. Коробкина Е.А. (ИВП РАН, Москва)

ISBN 978-5-9905659-7-5

Материалы конференции публикуются с сохранением авторского стиля изложения с небольшими редакторскими правками, в основном, в отношении пунктуации и орфографии. Ответственность за содержание представленных к публикации докладов и иллюстраций к ним несут авторы.

Организация конференции и издание материалов конференции осуществлены Институтом водных проблем Российской академии наук при финансовой поддержке Федерального агентства водных ресурсов Министерства природных ресурсов и экологии РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-05-20694).

© ИВП РАН

© Авторы докладов

© Евгения Бубер, оригинал-макет, дизайн полос, верстка, [www.igiuk.com](http://www.igiuk.com)

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН И ВЫСОКОГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Рец Е.П.<sup>1</sup>, Фролова Н.Л.<sup>2</sup>, Киреева М.Б.<sup>2</sup>, Лошакова Н.А.<sup>2</sup>, Чижова Ю.Н.<sup>3</sup>, Буданцева Н.А.<sup>3</sup>, Васильчук Ю.К.<sup>3</sup>, Токарев И.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Институт водных проблем РАН, Москва*

*retska@mail.ru*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, Москва*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, Москва*

<sup>4</sup> *Ресурсный центр СПбГУ "Геомодель", Санкт-Петербург*

Результативность изотопных методов при исследовании природных водных объектов со сложным режимом, труднодоступных и в суровых климатических условиях была продемонстрирована на примере высокогорного бассейна р. Джанкуат с большой долей оледенения (Северный Кавказ) и меромиктического водоема – оз. Трёхцветное (побережье Кандакского залива Белого моря).

Результативность изотопных методов при исследовании природных водных объектов со сложным режимом, труднодоступных и в суровых климатических условиях была продемонстрирована на примере высокогорного бассейна р. Джанкуат с большой долей оледенения (Северный Кавказ) и меромиктического водоема – оз. Трёхцветное (побережье Кандакского залива Белого моря).

В гидрологических исследованиях природные изотопы кислорода (<sup>18</sup>O) и водорода (дейтерий и тритий) широко применяются в качестве естественных трассеров, что обусловлено их консервативным поведением в воде и значительной вариабельностью изотопных соотношений <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H и <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O. Вариации и соотношение таких изотопов кислорода и водорода, существующие в природе, характеризуют процессы конденсации влаги, испарения и смешения вод разного генезиса. Все воды (дождевые, талые снеговые и ледниковые), как правило, имеют свой индивидуальный изотопный состав, нередко существенно различающийся.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ

Трёхцветное озеро расположено в Пеккелинской губе Белого моря. Размеры водоема: 340 м × 150 м, наибольшая глубина 7,5 м. Абсолютная отметка льда в феврале 2014 г. – 1,25 м, а поверхности воды – 0,85 м. Площадь водосбора – 643 809 м<sup>2</sup>, площадь самого озера – 32 407 м<sup>2</sup>. Приливных колебаний не наблюдается.

Также были исследованы еще четыре водоема, находящиеся на разных стадиях отделения от моря: лагуна на Зеленом мысу, Кисло-Сладкое (полупресная лагуна), Нижнее Ершовское и Верхнее

Ершовское. В указанных водоемах изучены изотопные, гидрофизические и биологические характеристики на разных глубинах. Отбор проб воды и льда из озера Трёхцветное был проведен 21 марта 2012 г., 18 марта 2013 г., 2 февраля 2014 г., 16 июня 2014 г. и 31 января 2015 г.

Высокогорный бассейн р. Джанкуат площадью 9,09 км<sup>2</sup> со средней высотой 3285 м и степенью оледенения около 0,5 расположен в приводораздельной части северного склона Главного Кавказского хребта. Это – типичный участок альпийского высокогорья с широко развитым оледенением. Комплексные наблюдения в горно-ледниковом бассейне Джанкуат по программе МГД начаты сотрудниками МГУ ещё в 1965 г. и ведутся до настоящего времени без перерывов.

Программа полевых работ 2013 и 2014 гг. включала: 1) измерение стока р. Джанкуат в течение периода абляции с временным шагом 1 час; 2) отбор проб воды р. Джанкуат на стабильные изотопы в замыкающем створе в течение периода абляции: в 2014 г. – два раза в сутки (всего 674 пробы), в 2013 г. было сделано 5 серий суточных ходов [Чижова и др., 2014]; 3) отбор проб снега, фирна и льда с различных частей ледника Джанкуат, атмосферных осадков, а также соответствующих проб из отдельных водотоков бассейна, для определения изотопного состава и минерализации (суммарно 209 проб); 4) регистрация электропроводности воды р. Джанкуат на гидрометрическом створе в течение всего сезона абляции 2014 г., ежесуточно по 5–8 сроков в день.

Изотопные определения выполнялись параллельно в двух лабораториях: в эколого-геохимиче-

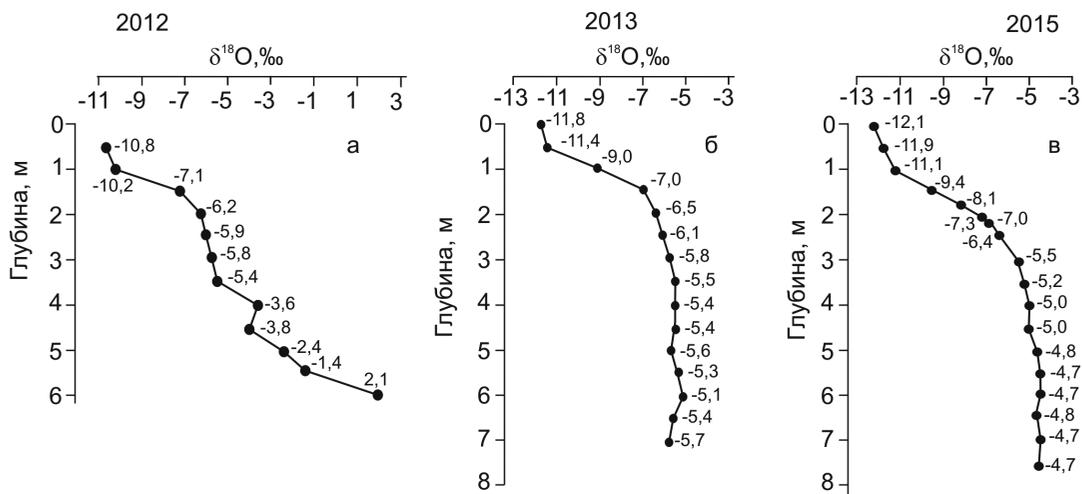


Рис. 1. Распределение вариаций  $\delta^{18}\text{O}$  по глубине в воде меромиктического озера Трёхцветное в 2012 (а), 2013 г. (б) и в 2015 г. (в)

ской лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч и в Ресурсном центре “Теомодель” Научного парка СПбГУ на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды Picarro L-2120i. Для измерений использовали международный стандарт среднеокеанической воды V-SMOW (значение  $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$ ), международный стандарт GISP (значение  $\delta^{18}\text{O} = -24,76\text{‰}$ ) лабораторные стандарты МАГАТЭ (IAEA 12, значение  $\delta^{18}\text{O} = -12,1\text{‰}$ , IAEA 13, значение  $\delta^{18}\text{O} = -33,35\text{‰}$ ), собственный лабораторный стандарт МГУ – снег ледника Гарабаши (значение  $\delta^{18}\text{O} = -15,60\text{‰}$ ). Точность определений составила  $\pm 0,1\text{‰}$  по кислороду-18 и  $\pm 1\text{‰}$  по дейтерию. Результаты определения  $\delta^{18}\text{O}$ , которые были получены независимо в ходе анализа двумя лабораториями, показали высокую степень сходимости. Коэффициент корреляции составил 0,97.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТОПНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЗ. ТРЕХЦВЕТНОЕ

Из всех исследованных водоемов района, отделяющихся от моря, оз. Трёхцветное лучше всех отвечает понятию меромиктического. Вертикальная стратификация сохраняется постоянной в течение года и не менялась на протяжении шести лет наблюдений. На дне водоема (с глубины от 1,5 м в 2012 г. до 2 м в последующие годы) расположена анаэробная зона с высоким содержанием сероводорода.

По изотопным данным оз. Трёхцветное типично меромиктическое, с полным выраженным профилем. В 2013 и 2015 году распределение  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  по глубине в целом подобно (рис. 1). Выделяется зона миксолимниона (0–1 м), со значе-

ниями  $\delta^{18}\text{O}$  варьирующими, в основном, в пределах  $-12$  –  $-11\text{‰}$  и значениями  $\delta\text{D}$  от  $-85$  до  $-93\text{‰}$ . Зона с переходными свойствами располагается на глубине 0,5–3,0 м, глубже, от 3,0 до 7,0 м – зона монимолимниона, в которой отмечены наиболее высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  (однако не превышающие эти значения для морской воды), и довольно однородное распределение значений по глубине от  $-5,5$  до  $-4,77\text{‰}$  в 2015 г. (от  $-5,82$  до  $-5,66\text{‰}$  в 2013 г.), а значения  $\delta\text{D}$  достигают  $-42,4\text{‰}$ .

Высокий сизигийный прилив в ноябре 2011 г., совпавший с ветровым нагоном, забросил свежую морскую воду в оз. Трёхцветное, для которого это является уникальным событием. В результате мощност миксолимниона в 2012 году была значительно больше последующих лет (рис. 1), а также он стал солоноватым ( $4,9$ – $5,2\text{‰}$ ).

В пределах слоя монимолимниона были получены необычные значения  $\delta\text{D}$ : в 2013 г. на глубине от 4 до 6,5 м –  $779,1$ – $1109,4\text{‰}$ , в 2015 г. на глубине 3,5–7,6 – от  $1638,4$  до  $2530,3\text{‰}$ , что может быть связано с высокой активностью микроорганизмов, которые осуществляют окислительно-восстановительные процессы с образованием водорода, сероводорода и метана.

Столь высокое содержание дейтерия не обнаруживается, как в других водоемах района, так и в прочих наземных природных объектах. В известных содовых меромиктических озерах экстремальные значения  $\delta\text{D}$  в воде достигают  $+29,7\text{‰}$  в кратерном озере вулкана Эль Чичон, в Мексике [Taran, Rouwet, 2008]. Единственный объект, по которому получены столь же высокие концентрации дейтерия – это воды, попутно извлекаемые при эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений – от  $10$ – $100$  до  $200$ ,  $500$  и до  $1300\text{‰}$  [Зыкин, 2012].

Таблица 1. Значения  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  и минерализации источников питания р. Джанкуат

	ЗИМНИЙ СНЕГ	ВЕСЕННИЙ СНЕГ	ФИРН	ЛЕД	ДОЖДЬ	ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ
Средняя $\delta^{18}O$ , ‰SMOW	-14,4	-7,4	-10,5	-13	-4,7	-11,5
интервал	-11 ... -19	-6 ... -9	-8 ... -14	-10... -16	0 ... -11,0	-11 ... -12
Средняя $\delta D$ , ‰SMOW	-101	-45	-70	-89	-21,1	-77
интервал	-67...-137	-28...-71	-53...-95	-65...-116	32 ... -85	
Средняя минерализация, мг/л	11,6	8,67	13,3	15,1	12,3	96,7
интервал	6,4...33,5	7,36...9,71	6,14...22,5	9,8...39,6	-	83,2...105

РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА  
ВЫСОКОГОРНОЙ РЕКИ ДЖАНКУАТ  
ПРИ ПОМОЩИ ИЗОТОПНО-  
ГИДРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА

Для высокогорных рек с большой долей оледенения бассейна характерна сложная структура питания, определяющая водный и гидрохимический режим стока. В структуре питания обычно выделяют не менее 5–6 компонент: таяние льда и фирна с различных частей ледника; таяние сезонного снега, как с ледниковой, так и с неледниковой части бассейна; летние дождевые осадки; подземные воды.

Наиболее тяжелый изотопный состав характерен для жидких атмосферных осадков: среднее содержание  $\delta^{18}O$  в отобранных пробах составило  $-4,7\text{‰}$ ,  $\delta D = -21,1\text{‰}$  (табл. 1). Также относительно более тяжелый изотопный состав характерен для отложившегося в период весенних снегопадов снежного покрова ( $\delta^{18}O$  в среднем  $-7,4\text{‰}$ ,  $\delta D = -45\text{‰}$ ). Наименьшая концентрация исследуемых изотопов характерна для зимнего снега ( $\delta^{18}O$  от  $-19$  до  $-11\text{‰}$ ,  $\delta D$  от  $-67$  до  $-137\text{‰}$ ). Фирн, лед и грунтовые воды имеют относительно схожий изотопный состав с точки зрения  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ , вследствие чего эти компоненты в общем стоке реки невозможно разделить, используя уравнение изотопного баланса.

Содержание  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  в пробах имеет тесную линейную связь между собой. Таким образом, в контексте задачи расчленения гидрографа данные показатели дублируют информацию, поэтому в дальнейшем использовалось только уравнение баланса  $\delta^{18}O$ .

В отличие от изотопов  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ , минерализация является неконсервативной характеристикой, она может быть показателем того, как вода стекала по водосбору. Та часть воды, которая сразу же стекает по поверхности ледника и затем по системе ручейков, не успевает насытиться растворенными солями, что обуславливает ее относительно низкую степень минерализации. Грунтовые воды и вода, которая протекает по непокрытой ледником части

бассейна, просачиваясь через мощный слой отложений, насыщается солями (до 105 мг/л).

Вследствие многокомпонентности структуры питания высокогорных рек, решение системы уравнений ионного, изотопного и водного баланса возможно только для тех фаз периода абляции, когда возможно пренебречь отдельными компонентами, чтобы уменьшить число неизвестных. Так, для конца периода абляции, когда можно пренебречь составляющей сезонного снега, была составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \delta^{18}O = (q_i + q_f) \delta^{18}O_{if} + q_{gr} \delta^{18}O_{gr} + q_p \delta^{18}O_p & (a) \\ q_i + q_f + q_{gr} + q_p = 1 & (b) \\ M = (q_i + q_f)M_{if} + (q_{gr} + q_p) M_{gr} & (c) \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_i$ ,  $q_f$ ,  $q_p$  и  $q_{gr}$  – это доли талой ледниковой воды, фирна, жидких атмосферных осадков и грунтовых вод в речном стоке;  $\delta^{18}O$  – концентрация  $^{18}O$  в речном стоке;  $\delta^{18}O_p$  и  $\delta^{18}O_{gr}$  – среднее значение концентрации  $^{18}O$  в жидких осадках и грунтовой составляющей, соответственно,  $\delta^{18}O_{if}$  – средняя концентрации  $^{18}O$  льда и фирна,  $M$  – фоновая минерализация в замыкающем створе,  $M_{if}$  – среднее значение минерализации льда и фирна,  $M_{gr}$  – среднее значение минерализации грунтовых вод.

Совместное решение уравнений (b) и (c) системы уравнений (1) для дней без значительных осадков, когда данной составляющей можно пренебречь, позволяет получить долю грунтовой составляющей в суммарном стоке р. Джанкуат. Так для сентября 2014 года средний расход грунтовых вод составил  $0,42 \text{ м}^3/\text{с}$ , а его доля – от 30 до 100% (рис. 2). Совместное решение уравнений (a) и (b) при известной величине грунтового стока, позволяет отделить талую компоненту от жидких атмосферных осадков в общем стоке реки Джанкуат (рис. 2) К концу периода абляции сток, образованный за счет таяния льда и фирна, постепенно истощается и совсем утрачивает свою силу к концу сентября.

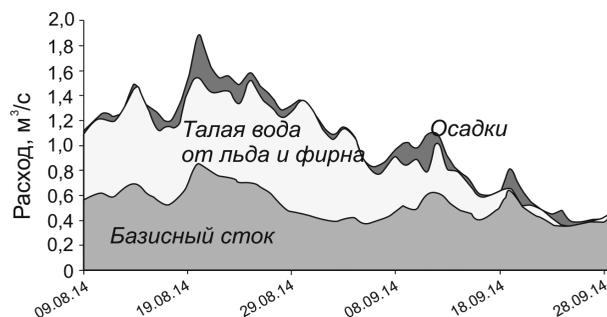


Рис. 2. Расчленение гидрографа р. Джанкуат за август – сентябрь 2014 г.

## ВЫВОДЫ

Применение изотопных методов ввиду консервативности изотопного состава вод различного происхождения, позволяет выявить генезис компонентов стока реки и водных масс водоема. Совместное решение уравнения изотопного, солевого и водного баланса позволило разделить генетические составляющие стока р. Джанкуат для конца периода абляции 2014 г. Полученные данные об изотопном

составе воды в оз. Трёхцветное позволяют сделать выводы о режиме взаимодействия с морскими водами. В пределах слоя мнимоледника озера были получены аномально высокие значения  $\delta D$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №14-27-00083 в части изотопного анализа), а также при поддержке фонда РФФИ (грант №14-05-31239 в части полевых исследований).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Рец Е.П., Лошакова Н.А., Поповнин В.В., Васильчук Ю.К. Вариации изотопно-кислородного состава талого стока ледника Джанкуат на Центральном Кавказе // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2014, № 6.

Зыкин Н.Н. Попутные воды нефтегазоконденсатных месторождений как нетрадиционное сырье для газо-

химического производства // Газовая промышленность, 2012. - Спец. вып. С. 38–42.

Taran Yu., Rouwet D. Estimating thermal inflow to El Chichon crater lake using the energy-budget, chemical and isotope balance approaches // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008. – Vol. 175(4) – P. 472–481.

## USING STABLE ISOTOPES TO INVESTIGATE COASTAL LAKES AND ALPINE RIVERS

Rets E.<sup>1</sup>, Frolova N.<sup>2</sup>, Kireyeva M.<sup>2</sup>, Loshakova N.<sup>2</sup>, Chizhova J.<sup>2</sup>, Budantseva N.<sup>2</sup>, Vasilchuk Yu.<sup>2</sup>, Tokarev I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Resource center "Geomodel", Research park, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia  
retska@mail.ru

### ABSTRACT

The effectiveness of isotope methods in the study of natural water bodies with complex hydrological regime, under the conditions of harsh climate and remoteness, has been demonstrated by the example of alpine basin Dzhankuat with a high degree of glaciation (the North Caucasus) and meromictic reservoir – lake Trekhctvetnoje (the coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea).