

## АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ МЕТАМОРФИЗАЦИИ ИОННОГО СОСТАВА УЛЬТРАПРЕСНЫХ ВОД АРКТИЧЕСКИХ РЕК РОССИИ

**О. С. Решетняк**

Гидрохимический институт Росгидромета, Южный федеральный университет  
(Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2022 г.

### Для цитирования

Решетняк О. С. Анализ вероятности метаморфизации ионного состава ультрапресных вод арктических рек России // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 3. — С. 437—448. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448.

---

*Впервые проведена классификация ионного состава ультрапресных вод арктических рек России в многолетнем аспекте и с учетом сезонности. Химический состав изменяется от гидрокарбонатно-кальциевых вод второго типа до сульфатных или гидрокарбонатно-сульфатных вод сложного катионного состава. Устойчивые изменения ионного состава речных вод обуславливают их метаморфизацию в сторону упрощения химического состава, изменения соотношений между катионами и анионами или изменения только анионного состава. Выявленный процесс метаморфизации ультрапресных речных вод может стать причиной появления гидрохимических аномалий в содержании главных ионов.*

**Ключевые слова:** ультрапресные речные воды, Арктическая зона, метаморфизация природных вод, ионный состав воды, гидрохимические аномалии.

### Введение

Исследование экосистем Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) входит в число государственных приоритетов, призванных обеспечить устойчивое развитие и экологическую безопасность в регионе. Под влиянием климатических изменений и антропогенных воздействий произошли существенные изменения в водных экосистемах АЗРФ. Интенсивная хозяйственная деятельность привела к значительному загрязнению водной среды арктических рек. Дополнительное поступление загрязняющих веществ в уязвимые арктические экосистемы может привести к техногенной трансформации химического состава и переходу экосистем в новое состояние [1; 2].

В настоящее время нет однозначного представления о том, влияние каких факторов — природных или техногенных (антропогенных) — более значимо для водных объектов. Техногенное загрязнение водосборных территорий, бесспорно, оказывает негативное воздействие на химический состав воды рек арктического региона, но основные процессы его

формирования протекают под действием прямых мощных природных факторов (выветривания почв и пород, выпадения атмосферных осадков, влияния подземных вод и др.) [3].

Одной из предпосылок техногенной метаморфизации природных вод является увеличение их минерализации, возможное изменение кислотности среды, концентрации отдельных ионов и др. Признаками антропогенного влияния на химический состав речных вод (особенно ультрапресных) являются нарушение естественного соотношения между главными ионами (метаморфизация химического состава воды) и утрата корреляционной зависимости между концентрациями главных ионов и расходом воды [3].

Под влиянием различных внешних факторов может меняться химический состав природных вод. Эти изменения могут носить либо периодический и циклический характер, связанный с природно-климатическими особенностями и сезонами года, либо однонаправленный характер (необратимый), обусловленный процессами трансформации природных вод (метаморфизация природных вод). Понятие метаморфизации природных вод введено в науку

Н. С. Курнаковым применительно к формированию минеральных озер и подземных вод [4]. Иногда к процессам метаморфизации необоснованно относят обратимое изменение состава воды, вызванное процессами осадкообразования (выпадением в осадок труднорастворимых солей) в летний период [5].

Наиболее типичные явления метаморфизации природных вод — обменные реакции, протекающие на границе раздела фаз «почва — вода», окислительно-восстановительные реакции, смешение вод и другие необратимо протекающие процессы, приводящие к устойчивым изменениям в химическом составе воды. Наиболее ярко процессы метаморфизации проявляются в подземных водах, а в поверхностных они менее вероятны. Однако в современных условиях антропогенного воздействия наблюдается усиление процессов техногенной метаморфизации природных вод (в том числе и поверхностных, речных и др.) [6].

По мнению М. Г. Валяшко, «...отличительной особенностью выделенных типов вод является то, что переход состава воды из одного химического типа в другой не может быть осуществлен иначе, как путем взаимодействия с веществом окружающей среды. Процесс направленного изменения химического состава воды под действием физико-географических условий, в результате которого происходит постепенное изменение состава и переход его из одного класса в другой, называется процессом метаморфизации природных вод» [7].

Первые работы по изучению процессов и механизмов метаморфизации природных вод появились еще в 30—60-х годах прошлого века. Изучались «метаморфизация различных геохимических и генетических типов подземных вод за счет обменно-адсорбционных процессов, ...роль катионного обмена в формировании химического состава подземных вод, ...метаморфизация морских вод в ходе терригенного осадконакопления» [8]. Позже появились работы по изучению данных процессов в поверхностных водах, но большинство исследований было посвящено изучению водоемов, озер и других замкнутых водных экосистем.

Современных исследований по изучению метаморфизации речных вод мало, и большая их часть затрагивает реки аридной зоны, где процессы метаморфизации наиболее ярко выражены. В [9] на примере остаточных водоемов Аральского моря (в том числе Сырдарья) показано, что происходят рост концентрации сульфатов и трансформация стока. При этом авторы отмечают, что «метаморфизация ионного состава вод отдельных водоемов продолжается до настоящего времени и влечет за собой изменения физических свойств воды, таких как плотность, соленость, а также влияет на нормы испарения и температуру замерзания воды».

Изучение процессов метаморфизации может быть использовано для оценки генетической однородности ионного состава воды и выявления факторов, определяющих его трансформацию. Так, на при-

мере озера Балхаш, Малого Арала и рек Сырдарья и Илек установлено, что «многообразие природных и антропогенных факторов обуславливает глубокие изменения в ионном составе речных вод, что приводит к определенным процессам метаморфизации» [10]. Основным антропогенным фактором усиления процесса метаморфизации природных вод в данном бассейне является орошаемое земледелие («возвратные воды с полей орошения»).

Если рассматривать вероятность метаморфизации природных вод северных регионов, то там имеет место влияние криогенных процессов на формирование и трансформацию ионного состава воды. В [11] показано, что преобладание ионов магния над кальцием в химическом составе воды малых рек Северного Сихотэ-Алиня (бассейн Амура) может быть обусловлено именно криогенной метаморфизацией вод.

Изучение особенностей химического состава воды позволило авторам [12] выявить особенности метаморфизации воды водохранилищ, сооруженных на реках. В бассейне Верхнего Иртыша в водохранилищах происходит «многоступенчатый процесс прямой и обратной метаморфизации: из карбонатного типа (в реке Черный Иртыш) в сульфатный (верхняя часть Зайсано-Бухтарминского водохранилища), затем опять в карбонатный (нижняя часть водохранилища) и вновь в сульфатный (ниже водохранилища)». Таким образом, «в зависимости от особенностей речного водохранилища в нем возможны процессы как прямой, так и обратной метаморфизации».

Современные исследования зарубежных авторов особенностей химического состава природных вод и возможной метаморфизации направлены на изучение региональных особенностей [13; 14] или глобальных процессов, таких как углеродный цикл [15; 16], что особенно актуально в условиях климатических изменений. Традиционно много работ по трансформации ионного состава подземных вод.

Авторы [13] изучили сезонную трансформацию ионного состава воды рек Северного Китая, выделили доминирующие компоненты и их соотношение. Это позволило выявить возможные факторы изменения состава воды и установить, что вклад в загрязнение от транспорта на урбанизированной территории увеличивается с ростом экономического развития отдельных областей.

Изучение гидрохимических процессов формирования подземных вод (таких, как растворение и выветривание различных минералов, катионный обмен) — отправная точка для понимания геохимических особенностей состава подземных вод и происходящих в них эволюционных процессов. Это, в свою очередь, является основой для поиска месторождений и разведки запасов подземных водных ресурсов (минеральных вод) и защиты подземных вод от загрязнения [14].

Представленные выше исследования позволяют не только оценивать возможную метаморфизацию природных вод, но и изучать процессы и факторы их

трансформации, выявлять источники загрязнения вод в случае техногенной метаморфизации, а также решать глобальные геохимические вопросы. В таком контексте представленная работа имеет высокую важность и актуальность.

**Цель исследования** — выявить возможную (природную или техногенную) метаморфизацию ионного состава речных вод арктического региона в условиях климатических изменений за многолетний период. Реализация поставленной цели выполнена на примере отдельных рек или их участков в пределах Арктической зоны Российской Федерации, вода которых относится к категории ультрапресных вод.

Результаты исследований могут быть в дальнейшем использованы при изучении гидролого-гидрохимических особенностей арктических рек в современных условиях антропогенного воздействия и климатических изменений.

### Объекты исследования, материалы и методы

Важной характеристикой природных вод является минерализация, под которой понимается суммарное содержание всех растворенных минеральных веществ. Это содержание выражают в виде суммы ионов для пресных вод в мг/дм<sup>3</sup> [17]. Минерализация природных вод меняется в широких пределах: от единиц мг/дм<sup>3</sup> до сотен г/дм<sup>3</sup> (‰). До сих пор нет единого мнения относительно принципов подразделения природных вод по минерализации. Общепринятым является только значение минерализации, характеризующее границу пресных вод, т. е. 1 мг/дм<sup>3</sup>, и это значение присутствует во всех классификациях. Аналогична ситуация и с выделением градаций внутри пресных вод. Так, согласно И. К. Зайцеву, пресные воды делятся на «весьма пресные» с минерализацией менее 0,1‰, «нормально пресные» (0,1—0,5‰) и «жесткие пресные»

(0,5—1,0‰). По классификации А. М. Овчинникова природные воды подразделяются на пресные и соленые, далее пресные воды дифференцируются на «ультрапресные» с минерализацией менее 0,2 г/дм<sup>3</sup>, «пресные» (0,2—0,5 г/дм<sup>3</sup>) и «воды с относительно повышенной минерализацией» (0,5—1,0 г/дм<sup>3</sup>) [17].

По классификации О. А. Алекина пресные речные воды по минерализации делятся на пять категорий [17]: с очень низкой минерализацией — менее 0,1 г/дм<sup>3</sup>, с малой (0,1—0,2 г/дм<sup>3</sup>), средней (0,2—0,5 г/дм<sup>3</sup>), повышенной (0,5—1,0 г/дм<sup>3</sup>) и высокой минерализацией (более 1,0 г/дм<sup>3</sup>).

В настоящем исследовании к категории ультрапресных речных вод отнесены участки арктических рек, вода которых за многолетний период характеризуется минерализацией менее 0,2 г/дм<sup>3</sup> (или менее 200 мг/дм<sup>3</sup>).

**Материалы исследования:** многолетние режимные гидрохимические данные (1980—2020 гг.) Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета, характеризующие концентрации главных ионов и значения минерализации воды рек арктического региона (<https://gidrohim.com>). Автором выполнены сбор и анализ первичных данных, проведены пересчеты значений массовых концентраций в процентные в пересчете на эквивалент вещества. Далее полученная информация проанализирована.

**Объекты исследования:** участки рек АЗРФ: Вирмы, Колосйоки, Печенги, Териберки, Уры, Поноя, Печоры, Енисея, Правой Хетты, Седэ-Яхи, Надьма, Алазеи, Анабара, Бытантая, Индигирки, Колымы, Сартанга и Яны, характеризующиеся низкой минерализацией воды (менее 200 мг/дм<sup>3</sup>) за многолетний период. Среднемноголетние значения минерализации воды в разных частях АЗРФ изменяются от 26,0—81,5 мг/дм<sup>3</sup> на участках рек европейской части до 59,8—125,5 мг/дм<sup>3</sup> на участках рек западносибирской ее части (табл. 1).

**Таблица 1. Характеристика минерализации и ионного состава ультрапресных речных вод АЗРФ за многолетний период (1980—2020 гг.) (составлено автором по данным ГНС)**

**Table 1. Characteristics of mineralization and ionic composition of ultra-fresh river waters of the Russian Arctic for a long-term period (1980—2020) (compiled by the author according to the data of the State Observation Network)**

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Минерализация воды *, мг/дм <sup>3</sup>	Классификация ионного состава воды			
			Класс	Группа	Тип	Частота встречаемости, %
Европейская часть АЗРФ						
1	Вирма, поселок Ловозеро	(7,4—192,0)/43,5	C	NaCaMg **	I/II	46,4
			C	Na	I	39,3
2	Колосйоки, поселок Никель	(9,6—177,0)/40,2	CS	Ca	II	35,7
			S	Ca	II	32,1
3	Печенга, станция Печенга	(10,5—194,0)/81,5	S	NaCaMg	II	64,3

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Минерализация воды *, мг/дм <sup>3</sup>	Классификация ионного состава воды			
			Класс	Группа	Тип	Частота встречаемости, %
4	Поной, село Краснощелье	(6,9—109,0)/25,2	C	Na Ca	II	55,9
5	Печора, Нарьян-Мар	(20,6—200,6)/77,3	C	Ca	II	73,7
6	Териберка, 60-й километр Серебрянской автодороги	(9,3—106,7)/26,0	C	Na	I/II	35,7
			CCI	Na	II/III	32,1
7	Ура, село Ура-Губа	(12,0—99,6)/27,0	C	Na	I/II	32,1
			CCI	Na	II/III	32,1
<i>Западносибирская часть АЗРФ</i>						
8	Енисей, Игарка	(40,6—199,8)/113,7	C	Ca	II	77,8
9	Правая Хетта, поселок городского типа Пангоды	(8,1—194,0)/66,4	C	Na	I/II	37,0
			CS	Na	I/II	14,8
10	Седзяха, Новый Уренгой	(16,6—166,0)/59,8	C ( SC)	Na	I/II	46,4
			C	Mg (MgCa)	II	21,4
11	Надым, Надым	(5,9—200,0)/62,6	C	Na	I/II	37,5
			C	Mg NaCa	I	28,1
<i>Восточносибирская часть АЗРФ</i>						
12	Алазея, поселок Андрушкино	(16,8—155,0)/60,0	C	Ca	II	31,8
			C	CaMg	I/II	27,3
13	Анабар, село Саскылах	(19,4—188,0)/58,3	C	Ca	III	93,9
14	Индибирка, поселок Индигирский	(12,0—111,7)/44,2	C	Ca	II	77,8
15	Индибирка, поселок Чокурдах	(19,9—189,0)/84,4	C	Ca	II	89,3
16	Колыма, Среднеколымск	(7,9—136,0)/72,4	C	Ca	II	91,2
17	Колыма, село Колымское	(17,0—177,0)/78,8	C	Ca	II	70,3
18	Колыма, поселок Черский	(17,0—156,6)/63,1	C	Ca	II	62,5
19	Бытантай, село Асар	(18,8—106,0)/57,2	C	Ca	II	68,4
20	Сартанг, село Бала	(17,0—166,0)/61,7	C	Ca	II	74,4
21	Яна, поселок Батагай	(7,9—199,0)/69,8	C	Ca	II	66,7

\* В числителе указан диапазон изменения минерализации воды, в знаменателе — среднее значение за многолетний период.

\*\* Две строки для одного участка реки означают, что ионный состав характеризуется изменчивостью — приведены два наиболее часто встречаемых сочетания класс/группа/тип за многолетний период.

**Методика исследования.** Разнообразие качественных и количественных характеристик химического состава речных вод стало причиной разработки их систематизации и классификации по особенностям ионного состава. Классификаций при-

родных вод создано немало, но наиболее удачной и широко используемой применительно к речным водам является классификация О. А. Алекина [17]. В ее основе лежат два основных принципа — принцип преобладающих анионов и катионов в ионном

составе и принцип учета соотношения между ионами. К преобладающим относятся ионы с наибольшим процентным содержанием (в %-экв) в пересчете на количество вещества эквивалента [18].

Все природные воды по преобладающему аниону делятся на три класса: гидрокарбонатные (С), сульфатные (S), хлоридные (Cl).

Каждый класс в зависимости от преобладающего катиона делится на три группы: кальциевую (Ca), магниевую (Mg) и натриевую (Na). Каждая группа делится на четыре типа вод по соотношению между ионами в процент-эквивалентных содержаниях [18].

Первый тип вод (I) характеризуется соотношением  $\text{HCO}_3^- > (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ , второй тип (II) —  $\text{HCO}_3^- < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ , третий тип (III) —  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  или, что то же самое,  $(\text{Cl}^- > \text{Na}^+)$ . Четвертый тип вод (IV) характеризуется отсутствием карбонат-ионов:  $\text{C}(\text{HCO}_3^-) = 0$ , т. е. это кислые воды.

Для исследуемых участков рек Арктической зоны выполнен пересчет массовых концентраций в процентные (по количеству вещества эквивалента). Далее определены класс, группа и тип природных вод с учетом принципов классификации О. А. Алекина за каждый год многолетнего периода и по сезонам. На основе этих данных проведена классификация ультрапресных речных вод и выявлены особенности их ионного состава.

Для оценки возможной метаморфизации ионного состава речных вод арктического региона многолетние ряды гидрохимических данных о содержании главных ионов в воде были разбиты на два условных периода: с начала систематических наблюдений на реках до 1999 г. включительно (период 1) и современный период с 2000 по 2020 гг. (период 2). Гипотеза исследования заключалась в том, что при отсутствии значимого антропогенного воздействия и влияния климатических изменений не будут наблюдаться значительные изменения в классе, группе и типе химического состава арктических рек (за многолетний период и по сезонам). При устойчивых изменениях в ионном составе воды арктических рек в многолетнем аспекте можно говорить о произошедшей метаморфизации. При этом установление характера метаморфизации — природного или техногенного — требует дальнейших исследований.

## Результаты и их обсуждение

### Классификация ультрапресных речных вод АЗРФ по химическому составу воды

Для классификации исследуемых участков рек выполнен пересчет массовых концентраций в процентные (по количеству вещества эквивалента), определены класс, группа и тип природных вод за каждый год. Далее данные обобщены, выделены наиболее характерные за многолетний период класс, группа и тип химического состава ультрапресных речных вод согласно классификации О. А. Алекина.

Как видно из данных табл. 1, ионный состав воды на участках рек европейской части АЗРФ характеризуется разнообразием: от наиболее простых гидрокарбонатно-кальциевых вод второго типа (Печора) до сульфатных вод сложного катионного состава (Печенга). В границах западносибирской части АЗРФ ультрапресные речные воды по химическому составу классифицируются как простые гидрокарбонатно-кальциевые воды второго типа (Енисей) и гидрокарбонатные воды сложного катионного состава с преобладанием натриевой группы (Правая Хетта и Седэяха). Реки восточносибирской части АЗРФ имеют одинаковый (стабильный) ионный состав воды — в основном это гидрокарбонатно-кальциевые воды второго типа за исключением реки Алазея, в химическом составе воды которой содоминируют катионы кальция и магния. Таким образом, проведена классификация речных вод Арктической зоны по химическому составу за многолетний период.

Для классификации ультрапресных речных вод АЗРФ по химическому составу с учетом сезонности выполнены аналогичные пересчеты концентраций, сгруппированных в выборки по сезонам (зима, весна, лето, осень) для каждого участка реки за период исследования. Были также определены класс и группа ионного состава воды по классификации О. А. Алекина за каждый сезон. Результаты обобщения данных по классификации ультрапресных речных вод с учетом сезонности приведены в табл. 2.

Среди исследуемых ультрапресных речных вод европейской части АЗРФ выделяются участки с относительно стабильным химическим составом (реки Вирма, Печенга, Поной и Печора) и меняющимся в течение года (реки Колосйоки, Териберка и Ура). Наиболее стабильны (т. е. отсутствует сезонная трансформация) химический состав воды на устьевом участке Печоры (гидрокарбонатный класс, кальциевая группа, см. табл. 2), а наименее — в устьях Уры и Териберки, в зависимости от сезона он варьирует от гидрокарбонатно-натриевого и хлоридно-натриевого состава до гидрокарбонатно-хлоридного класса со сложным (смешанным) катионным составом, а также Колосйоки — от сульфатно-кальциевого состава до сульфатного класса кальциево-натриевого состава.

Таким образом, с учетом значительной изменчивости химического состава воды на устьевых участках Колосйоки, Териберки и Уры можно прогнозировать выявление процесса метаморфизации их ионного состава (природного или техногенного характера).

На основе анализа результатов классификации химического состава ультрапресных речных вод сибирской части арктического региона (см. табл. 2) исследуемые участки рек можно разделить на три группы: с постоянным (стабильным) ионным составом воды, с незначительно меняющимся и сильно варьирующим в течение года. К первой группе от-

Таблица 2. Классификация с учетом сезонности ионного состава ультрапресных речных вод АЗРФ (составлено автором)

Table 2. Classification taking into account the seasonality of the ionic composition of ultra-fresh river waters of the Russian Arctic (compiled by the author)

Река, пункт наблюдений	Сезон	Класс	Группа	Река, пункт наблюдений	Сезон	Класс	Группа
<i>Европейская часть АЗРФ</i>							
1. Вирма, поселок Ловозеро	Зима	C	NaCa	5. Печора, выше деревни Оксино (Нарьян-Мар)	Зима	C	Ca
	Весна	C	Na/NaCa		Весна	C	Ca
	Лето	C	Na		Лето	C	Ca
	Осень	C	Na/NaCa		Осень	C	Ca
2. Колосйоки, поселок Никель	Зима	SC	Ca	6. Печора, ниже Нарьян-Мара	Зима	C	Ca
	Весна	CS/S	Ca		Весна	C	Ca
	Лето	S	Ca		Лето	C	Ca
	Осень	S	Ca/CaNa		Осень	C	Ca/Na
3. Печенга, станция Печенга	Зима	S	NaCaMg	7. Териберка, 60-й километр Серебрянской автодороги	Зима	C	Na
	Весна	S	Na/ NaCaMg		Весна	C/CCI	CaNa
	Лето	S	CaMgNa		Лето	CCI /CI	Na/Ca
	Осень	S	CaMg/ CaMgNa		Осень	CCI	CaNaMg/ Na
4. Поной, село Краснощелье	Зима	—	—	8. Ура, село Ура-Губа	Зима	CI	Na
	Весна	C	NaCa/Na		Весна	CSCI	Na
	Лето	C	Na/ MgCa		Лето	CI	Na
	Осень	C	NaCa/Na		Осень	CCI /CI	Na
<i>Западносибирская часть АЗРФ</i>							
9. Енисей, выше Игарки	Зима	C	Ca	11. Седзяха, Новый Уренгой	Зима	—	—
	Весна	C	Ca		Весна	C/CS	NaCa/Na NaMgCa
	Лето	C	Ca		Лето	C	Na / Ca
	Осень	C	Ca		Осень	CS	NaMgCa/ NaCa
10. Правая Хетта, в черте поселка городского типа (пгт) Пангоды	Зима	C	Na	12. Надым, Надым	Зима	—	—
	Весна	C	Na/ NaCaMg		Весна	C	NaMgCa/ Na
	Лето	C	Na/NaMg		Лето	C/CS	Na
	Осень	C	Na		Осень	CS/C	Na
<i>Восточносибирская часть АЗРФ</i>							
13. Алазая, поселок Андрушкино	Зима	—	—	18. Колыма, село Колымское	Зима	C	Ca
	Весна	C	CaMg		Весна	C	Ca
	Лето	C	CaMg/Ca		Лето	C	Ca
	Осень	C	Ca/CaMg		Осень	C	Ca

Река, пункт наблюдений	Сезон	Класс	Группа	Река, пункт наблюдений	Сезон	Класс	Группа
14. Анабар, село Саскылах	Зима	С	Са	19. Колыма, поселок Черский	Зима	—	—
	Весна	С	Са		Весна	С	Са/CaNa
	Лето	С	Са		Лето	С	Са/CaNa
	Осень	С	Са		Осень	С	Са
15. Индигирна, поселок Индигирский	Зима	—	—	20. Бытынтай, село Асар	Зима	С	Са
	Весна	С/С	Са		Весна	С	Са
	Лето	С/С	Са		Лето	С	Са
	Осень	С	Са		Осень	С	Са
16. Индигирна, поселок Чокурдах	Зима	—	—	21. Сартанг, село Бала	Зима	С	СаMg
	Весна	С	Са		Весна	С	Са
	Лето	С	Са		Лето	С/С	Са
	Осень	С	Са		Осень	С	Са
17. Колыма, Среднеколымск	Зима	—	—	22. Яна, поселок Батагай	Зима	—	—
	Весна	С	Са		Весна	С	Са
	Лето	С	Са		Лето	С	Са
	Осень	С	Са		Осень	С/С / С	Са

носятся участки Енисея (Игарка), Анабара (село Саскылах), Индигирки (поселок Чокурдах), Колымы (Среднеколымск и село Колымское), Бытынтай (село Асар), составляющие 42,9% числа речных участков сибирской части АЗРФ.

Вторая группа включает участки таких арктических рек, как Правая Хетта (в черте пгт Пангоды), Алазея (Андрюшкино), Индигирна (поселок Индигирский), Колыма (поселок Черский) и Яна (поселок Батагай), вода которых характеризуется незначительно меняющимся в течение года химическим составом (изменение претерпевает либо класс, либо группа ионного состава воды). Доля таких участков — 35,7%.

На участках рек Седэяха (Новый Уренгой), Надым (Надым) и Сартанг (село Бала) содержание главных ионов (ионный состав) в течение года меняется наиболее значительно (происходит смена и доминирующих анионов, и катионов, см. табл. 2). Доля участков рек третьей группы в сибирской части АЗРФ составляет 21,4%.

Наибольшей стабильностью характеризуется химический состав воды на отдельных участках Енисея, Анабара, Индигирки, Колымы и Бытынтай, для которых во все сезоны года преобладает гидрокарбонатный класс, кальциевая группа. Наиболее выраженные изменения ионного состава в течение года наблюдаются на устьевых участках Седэяхи, Надыма и Правой Хетты, химический состав воды

которых в зависимости от сезона варьирует от гидрокарбонатного класса с преобладанием натриевой группы до гидрокарбонатно-сульфатного класса со смешанным катионным составом (см. табл. 2). Именно для этих участков рек ожидаемо усиление метаморфизации ионного состава воды.

#### Выявление вероятности метаморфизации ионного состава ультрапресных речных вод АЗРФ

Если изменение химического состава воды происходит за счет смены гидрокарбонатного класса на сульфатный и далее на хлоридный, то такой процесс метаморфизации считается прямым (нормальным), если наоборот — обратным (обращенным). Это объясняется растворимостью солей в природных водах: прямая метаморфизация протекает за счет выпадения в осадок менее растворимых солей (сначала карбонатов и гидрокарбонатов, потом и сульфатов).

Развитию или усилению прямой метаморфизации способствуют процессы усиления аридизации климата, возрастание подвижности ионов кальция, рост минерализации воды за счет возрастания ее хлоридности, а процессу обратной метаморфизации — увеличение количества осадков и влажный климат (т. е. процесс рассоления дренируемых горных пород), снижение минерализации и возрастание карбонатности воды [7].

Таблица 3. Характеристика ионного состава воды на участках рек с ультрапресными водами АЗРФ по двум периодам (составлено автором)

Table 3. Characteristics of the ionic composition of water in sections of rivers with ultra-fresh waters of the Russian Arctic for two periods (compiled by the author)

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Класс — группа ионного состава воды за период	
		(1) — 1975—1999 гг.	(2) — 2000—2020 гг.
<i>Европейская часть АЗРФ</i>			
1	Вирма, поселок Ловозеро	C — NaCaMg	C — Na
2	Колосйоки, поселок Никель	S — Ca / S — MgCa	CS — Ca
3	Печенга, станция Печенга	S — NaCaMg	S — NaCaMg
4	Поной, село Краснощелье	C — CaNa	C — CaNa
5	Печора, ниже Нарьян-Мара	C — Ca	C — Ca
6	Териберка, 60-й километр Серебрянской автодороги	CCl — Na	C — Na
7	Ура, село Ура-Губа	CCl — Na	C — Na
<i>Западносибирская часть АЗРФ</i>			
8	Енисей, Игарка	C — Ca	C — Ca
9	Правая Хетта, пгт Пангоды	C — Na (CaNa)	CS — Na / C — Na / C — CaMg
10	Седзяха, Новый Уренгой	C — Na	C (CS) — Na (NaMg)
11	Надым, Надым	C — (Na) NaCaMg	C (CS) — Na / C — NaCaMg
<i>Восточносибирская часть АЗРФ</i>			
12	Алазея, поселок Андрушкино	C — Ca	C — CaMg
13	Анабар, село Саскылах	C — Ca	C — Ca
14	Индиگیرка, поселок Индиگیرский	C — Ca	C — Ca / S (CS) — Ca
15	Индиگیرка, поселок Чокурдах	C — Ca	C — Ca
16	Колыма, Среднеколымск	C — Ca	C — Ca
17	Колыма, село Колымское	C — Ca	C — Ca
18	Колыма, поселок Черский	C — Ca	C — Ca
19	Бытантай, село Асар	C — Ca	C (CS) — Ca
20	Сартанг, ниже села Бала	C — Ca	C — Ca / S (CS) — Ca
21	Яна, поселок Батагай	C — Ca	S (CS) — Ca / C — Ca

**Примечание.** Цветом выделены разные типы изменений: слабые — зеленоватым, сильные — оранжевым.

Таким образом, изучая изменения в химическом составе речных вод за многолетний период, можно выявить процессы метаморфизации (смену класса или типа природных вод). Для этого проведено сравнение особенностей ионного состава воды исследуемых участков рек Арктической зоны с ультрапресными водами за два условных периода (результаты представлены в табл. 3).

Ионный состав речных вод европейской части АЗРФ разнообразен в обоих периодах. Здесь формируются воды классического гидрокарбонатно-кальциевого состава (Печора), сульфатного класса (Колосйоки, Печенга), гидрокарбонатно-натриевого типа или со смешанным катионным составом (Вирма, Териберка, Ура, Поной) (см. табл. 3). Исследуемые участки рек европейской части АЗРФ можно



разделить на две группы: для Вирмы, Колосйоки, Териберки, Печенги и Уры наблюдаются слабые или сильные изменения в ионном составе воды, что говорит о возможной метаморфизации речных вод, а для Поной и Печоры характерен стабильный во времени химический состав воды. Изменения, наблюдаемые для рек первой группы, носят характер упрощения ионного состава, т. е. переход его из более разнообразного (с доминированием разных катионов и анионов) в менее разнообразный.

Анализ химического состава воды на участках рек с ультрапресными водами западносибирской части АЗРФ по периодам показал, что самая крупная река данного сектора Арктики Енисей характеризуется стабильным химическим составом воды, а средние реки имеют более разнообразный химический состав воды — гидрокарбонатного или сульфатного класса с доминированием одного или нескольких катионов щелочно-земельных металлов (см. табл. 3).

Для таких участков рек западносибирской части АЗРФ, как Правая Хетта, Седзяха и Надым, существует вероятность метаморфизации ионного состава воды за многолетний период, и наблюдаемые изменения носят различный характер: меняется класс или группа природных вод либо происходит перераспределение соотношения между доминированием ионов. Так, химический состав воды Седзяхи меняется с гидрокарбонатно-натриевого типа на гидрокарбонатно-сульфатный класс натриевой или натриево-магниевой группы (см. табл. 3).

Для Надыма ранее были выполнены более детальные исследования многолетних трендов главных ионов и выявлены предпосылки возможной техногенной метаморфизации ионного состава. Установлено увеличение минерализации воды Надыма за счет статистически значимого прироста содержания сульфатов ( $5,1 \text{ мг/дм}^3$  за десять лет) и ионов натрия и калия в воде ( $1,8 \text{ мг/дм}^3$  за десять лет) [3]. Наблюдаемые тенденции за многолетний период вызвали метаморфизацию ионного состава воды в нижнем течении Надыма, которая наиболее отчетливо проявилась с 2002 г., когда класс речных вод постепенно менялся с гидрокарбонатного (С) на смешанный (SC — сульфатно-гидрокарбонатный или CS — гидрокарбонатно-сульфатный) без больших изменений в катионном составе. Более значительные изменения были выявлены при классификации химического состава воды по сезонам и с разбивкой по двум периодам. С учетом сезонности трансформация ионного состава воды Надыма происходит не только в сторону смены гидрокарбонатного класса на смешанный, но и в сторону изменения доминирующего катиона с кальция на ионы натрия, что может свидетельствовать об усилении процессов засоления речных вод [3].

Химический состав ультрапресных речных вод восточносибирской части АЗРФ был стабилен в период с 1980 по 1999 гг. и имел гидрокарбонатно-кальциевый состав (см. табл. 3). С 2000 по 2020 гг. на-

блюдается метаморфизация ионного состава воды на нижних участках Индигирки, Бытантая, Сартанга и Яны только в части анионного состава. Более существенные изменения происходят в бассейне Яны: после 2000 г. наблюдается переход гидрокарбонатного класса к сульфатному или смешанному гидрокарбонатно-сульфатному классу с доминированием ионов кальция. Для Алазеи изменения проявляются только в катионном составе: отмечена смена кальциевой группы на кальциево-магниевую.

Обращают на себя внимание однотипные изменения (однотипная трансформация) ионного состава воды в бассейне Яны, что указывает на региональный характер факторов и процессов, обуславливающих метаморфизацию, скорее всего смешанного характера (природно-техногенного типа). Именно в районе поселка Батагай загрязнение воды Яны достигает максимального уровня. Здесь «под влиянием поверхностного и подземного стока с территории техногенной зоны (поселок Батагай, хвостохранилище и отвалы месторождения Эге-Хайя)» происходят не только ухудшение качества воды, формирование гидрогеохимических аномалий по содержанию в воде цинка [19], но и техногенная метаморфизация химического состава воды в целом.

Процесс метаморфизации ультрапресных речных вод в сторону смены гидрокарбонатного класса на сульфатный или хлоридный класс может стать причиной появления гидрохимических аномалий в содержании главных ионов. Ранее нами было показано, что для Арктической зоны характерно большое количество гидрохимических аномалий и в основном они обнаруживаются для сульфатов, гидрокарбонатов, органических веществ и ионов тяжелых металлов (чаще всего для железа и марганца) [20]. Аномалии по содержанию сульфатов в воде выявлены для Колосйоки и Печенги, что служит доказательством техногенной метаморфизации химического состава воды этих рек, водосборы которых расположены в зоне влияния предприятий горно-металлургического комплекса.

В целом анализ результатов классификации химического состава ультрапресных речных вод АЗРФ по периодам (см. табл. 3) позволяет разделить все исследуемые участки рек на три группы:

- с постоянным (стабильным) ионным составом воды (Понь, Печенга, Печора, Енисей, Анабар, Индигирка и Колыма); доля таких участков рек составила 42,9%;
- с незначительно меняющимся химическим составом во времени (Вирма, Териберка, Ура, Алазея, Индигирка (поселок Индигирский), Бытантай, Сартанг и Яна), когда изменение претерпевает либо класс, либо группа ионного состава воды; доля таких участков составила 38,1%;
- с сильно меняющимся содержанием главных ионов (метаморфизацией) за исследуемые периоды (происходит смена и доминирующих анионов, и катионов) — это участки Колосйоки, Правой Хетты,

Седзяхи и Надыма; доля участков рек этой группы составляет 19,1% в пределах АЗРФ.

Стоит отметить, что больше всего участков рек с высокой вероятностью метаморфизации ионного состава воды приурочено к западносибирской части АЗРФ, что может быть обусловлено сочетанием природных процессов и техногенного загрязнения, влияющих на усиление метаморфизации ионного состава речных вод.

### Заключение

На основе проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Химический состав ультрапресных вод рек Арктической зоны Российской Федерации характеризуется большим разнообразием: в европейской части — от наиболее простых гидрокарбонатно-кальциевых вод второго типа (Печора) до сульфатных вод сложного катионного состава (Печенга), в сибирской части — от гидрокарбонатно-кальциевых вод (Енисей) до гидрокарбонатно-сульфатных вод сложного катионного состава (Правая Хетта и Седзяха).

2. Впервые проведена оценка возможной метаморфизации ионного состава ультрапресных вод Арктической зоны на основе сравнения результатов классификации ионного состава воды с учетом сезонности и по двум периодам. Выявлена слабая вероятность метаморфизации воды Ви́рмы, Колосйюки, Териберки, Уры в сторону упрощения ионного состава, на устьевых участках Правой Хетты, Седзяхи и Надыма — в сторону изменения соотношений между доминированием анионов и катионов, для участка Индигирки в районе поселка Индигирский, Яны и ее притоков (Бытантая и Сартанга) — в сторону изменения только анионного состава.

3. Процесс метаморфизации ультрапресных речных вод в сторону смены гидрокарбонатного класса на сульфатный или хлоридный может стать причиной появления гидрохимических аномалий в содержании главных ионов. Аномалии по содержанию сульфатов в воде выявлены для Колосйюки и Печенги, что является доказательством техногенного характера метаморфизации ионного состава воды этих рек, водосборы которых расположены в зоне влияния предприятий горно-металлургического комплекса.

Результаты данного исследования могут в дальнейшем использоваться для оценки последствий хозяйственной деятельности на арктических водосборах, совершенствования системы наблюдений в регионе и разработки комплекса природоохранных мероприятий для уязвимых водных объектов АЗРФ в части решения приоритетных экологических проблем Арктики. Это позволит улучшить информативность и корректность оценки качества воды рек арктического региона с учетом региональных особенностей химического состава воды и возможных тенденций его изменения.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках госзадания Плана НИТР Росгидромета 2020—2024 гг., тема 4.2 «Развитие и модернизация технологий мониторинга поверхностных вод суши по гидрохимическим и гидробиологическим показателям».

### Литература/References

1. Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Косменко Л. С., Решетняк О. С. Антропогенная трансформация компонентного состава водной среды устьевой области р. Лены // Вод. ресурсы. — 2011. — Т. 38, № 2. — С. 181—192.  
*Nikanorov A. M., Bryzgalov V. A., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S. Anthropogenic transformation of the component composition of the aquatic environment of the Lena River estuary region. Vodnye resursy, 2011, vol. 38, no. 2, pp. 181—192. (In Russian).*
2. Брызгалов В. А., Никаноров А. М., Косменко Л. С., Решетняк О. С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. — Ростов/Д: Изд-во Юж. федер. ун-та, 2015. — 164 с.  
*Bryzgalov V. A., Nikanorov A. M., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S. Estuarine ecosystems of large rivers of Russia: anthropogenic load and ecological state. Rostov-on-Don, Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2015, 164 p. (In Russian).*
3. Даниленко А. О., Косменко Л. С., Решетняк О. С., Кондакова М. Ю. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений // Изв. РАН. Сер. Географическая. — 2020. — № 1. — С. 127—137. — DOI: 10.31857/S2587556620010069.  
*Danilenko A. O., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S., Kondakova M. Yu. Prerequisites of technogenic metamorphosis of the ionic composition of the Nadym River water under conditions of global climate change. Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya, 2020, no. 1. pp. 127—137. DOI: 10.31857/S2587556620010069. (In Russian).*
4. Посохов Е. В. Формирование химического состава подземных вод. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1966. — 258 с.  
*Posohov E. V. Formation of the chemical composition of groundwater. Leningrad, Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1966, 258 p. (In Russian).*
5. Дуров С. А. Геометрический метод в гидрохимии. — Ростов/Д: Рост. кн. изд-во, 1959. — 196 с.  
*Durov S. A. Geometric method in hydrochemistry. Rostovskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1959, 196 p. (In Russian).*
6. Янин Е. П. Изменение химического состава и техногенная метаморфизация речных вод в промышленно-урбанизированных районах // Науч. и техн. аспекты охраны окружающей среды. — 2006. — № 3. — С. 2—27.  
*Yanin E. P. Changes in the chemical composition and technogenic metamorphosis of river waters in in-*

- dustrially urbanized areas. Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchei sredy, 2006, no. 3, pp. 2—27. (In Russian).
7. Никаноров А. М. Гидрохимия: Учебник / Изд. 3-е, доп. — Ростов/Д: НОК, 2008. — 461 с.  
Nikanorov A. M. Hydrochemistry: Textbook. Rostov-on-Don, NOK, 2008, 461 p. (In Russian).
8. Попов В. Г., Абдрахманов Р. Ф. Ионнообменная концепция в генетической гидрогеохимии / Под ред. проф., акад. РАН В. Г. Попова. — Уфа: Гилем; Башк. энцикл., 2013. — 356 с.  
Popov V. G., Abdrakhmanov R. F. Ion exchange concept in genetic hydrogeochemistry. Ufa, Gilem, Bashkirskaya entsiklopediya, 2013, 356 p. (In Russian).
9. Андрулиони Н. Ю., Завьялов П. О., Ижицкий А. С. Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря // Океанология. — 2022. — Т. 62, № 1. — С. 1—17.  
Andrulioni N. Yu., Zav'yalov P. O., Izhitskii A. S. Modern evolution of the salt composition of the residual basins of the Aral Sea. Oceanology, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 1—17. (In Russian).
10. Мукашева А. С., Лопарева Т. Я. Генетическая однородность ионно-солевого состава воды Балхаш-Илейского и Арало-Сырдарьинского бассейнов // Вест. АГТУ. Сер. Рыб. хоз-во. — 2013. — № 2. — С. 111—115.  
Mukasheva A. S., Lopareva T. Ya. Genetic homogeneity of the ion-salt composition of the water of the Balkhash-Ili and the Aral-Syrdarya basin. Vestnik AGTU. Ser. Rybnoe khozyaistvo, 2013, no. 2, pp. 111—115. (In Russian).
11. Форина Ю. Ф. Особенности химического состава воды малых рек Северного Сихотэ-Алиня // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. — 2011. — Вып. 5. — С. 557—562.  
Forina Yu. F. Features of the chemical composition of the water of small rivers of the Northern Sikhote-Alin. Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova, 2011, iss. 5, pp. 557—562. (In Russian).
12. Романова С. М., Пономаренко О. И. Особенности химического состава воды водохранилищ, сооруженных на реках // Гидрометеорология и экология. — 2015. — № 2. — С. 109—120.  
Romanova S. M., Ponomarenko O. I. Features of the chemical composition of water reservoirs built on rivers. Gidrometeorologiya i ekologiya, 2015, no. 2, pp. 109—120. (In Russian).
13. Xu Dao, Zhen Wang, Yibing Lv, Enjiang Teng, Linlin Zhang, Chao Wang. Chemical Characteristics of Water-Soluble Ions in Particulate Matter in Three Metropolitan Areas in the North China Plain. PLoS ONE, 2014, 9 (12), p. e113831. DOI: 10.1371/journal.pone.0113831.
14. Biao Zhang, Dan Zhao, Pengpeng Zhou, Shen Qu, Fu Liao and Guangcai Wang. Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water–Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. Water, 2020, 12, p. 836. DOI: 10.3390/w12030836.
15. McDonough L. K., Andersen M. S., Behnke M. I. et al. A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter. Nature Communications, 2022, 13. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29711-9>.
16. Wang D., Han G., Li B., Wang D., Han G., Li B., Hu M., Wang, Y., Liu J., Zeng J., Li X. Characteristics of Ions Composition and Chemical Weathering of Tributary in the Three Gorges Reservoir Region: The Perspective of Stratified Water Sample from Xiaojiang River. Water, 2022, 14, p. 379. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14030379>.
17. Справочник по гидрохимии / Под ред. д-ра геол.-минерал. наук А. М. Никанорова. — Л.: Гидрометеороиздат, 1989. — 391 с.  
Handbook of Hydrochemistry. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 391 p. (In Russian).
18. Алевин О. А. Основы гидрохимии: учебное пособие. — Л.: Гидрометеороиздат, 1970. — 442 с.  
Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry: a textbook. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 442 p. (In Russian).
19. Макаров В. Н. Гидрогеохимические аномалии цинка в р. Яна // Наука и техника в Якутии. — 2020. — № 2 (38). — С. 26—30.  
Makarov V. N. Hydrogeochemical anomalies of zinc in the Yana River. Nauka i tekhnika v Yakutii, 2020, no. 2 (38), pp. 26—30. (In Russian).
20. Даниленко А. О., Косменко Л. С., Кондакова М. Ю., Решетняк О. С. Характеристика уровней содержания и гидрохимических аномалий в речных водах Арктической зоны РФ // Тр. III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». — СПб.: Химиздат, 2019. — С. 467—470.  
Danilenko A. O., Kosmenko L. S., Kondakova M. Yu., Reshetnyak O. S. Characteristics of the levels of content and hydrochemical anomalies in the river waters of the Arctic zone of the Russian Federation. Trudy III Vserossiiskoi konferentsii "Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya". Saint Petersburg, Himizdat, 2019, pp. 467—470. (In Russian).

### Информация об авторе

Решетняк Ольга Сергеевна, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, Гидрохимический институт Росгидромета (344090, Россия, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 198), доцент, Южный федеральный университет (344006, Россия, Ростов-на-Дону, Б. Садовая ул., 105/42), e-mail: olgare1@mail.ru.

## PROBABILITY ANALYSIS OF METAMORPHIZATION OF THE IONIC COMPOSITION OF ULTRA-FRESH WATERS OF THE ARCTIC RIVERS OF RUSSIA

Reshetnyak, O. S.

Hydrochemical Institute of Roshydromet, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The article was received on December 6, 2022

### For citing

Reshetnyak O. S. Probability analysis of metamorphization of the ionic composition of ultra-fresh waters of the Arctic rivers of Russia. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 437—448. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448. (In Russian).

### Abstract

For the first time, the classification of the ionic composition of ultra-fresh waters of the Arctic rivers in Russia has been carried out in a long-term aspect and in view of seasonality. The features of the ionic composition of ultra-fresh waters of the Arctic rivers have been considered, the class, group and type of river waters have been established according to the classification of O. A. Alekin.

The chemical composition of the ultra-fresh rivers of the Russian Arctic zone is characterized by great diversity. These rivers vary from the most simple bicarbonate-calcium waters of the second type to sulfate or hydrocarbon-sulfate waters of a complex cationic composition.

For the estuarine sections of the Virma, Kolos-Yoki, Teriberka and Ura Rivers variability manifests itself in a simplification of the chemical composition. For the Pravaya Khetta, Sede-Yakha and Nadym Rivers, changes in the ratios between cations and anions have been revealed. For the Indigirka, Yana Rivers and its tributaries, changes have been noted only in the anionic composition. It is shown that it is for these rivers that the metamorphization of river waters is possible.

Most of the river sections with a high probability of metamorphization of the ionic composition of water are confined to the West Siberian part of the Russian Arctic zone. This is due to a higher anthropogenic load and a high degree of development of this area. For these sections of the rivers, the revealed metamorphization is of a technogenic nature. The metamorphization process of ultra-fresh river waters in the direction of changing the hydrocarbonate class to the sulfate or chloride class can cause the appearance of hydrochemical anomalies in the content of the main ions.

**Keywords:** *ultra-fresh river waters, Arctic zone, metamorphization of natural waters, ionic composition of water, hydrogeochemical anomalies.*

---

### Information about the author

Reshetnyak, Olga Sergeevna, PhD of Geographical Sciences, Senior Researcher, Hydrochemical Institute (198, Stachki Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344090), Associate Professor, Southern Federal University (105/42, B. Sadovaya St, Rostov-on-Don, Russia, 344006), e-mail: olgare1@mail.ru.

© Reshetnyak O. S., 2023