

Е.В. БОРОДИНАИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия, borev@igm.nsc.ru**ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАСЕЙНА КУРАГАНА
(ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

Представлены результаты количественного определения растворенных форм 55 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в воде малых рек, озер и в талых водах ледников и снежников бассейна Курагана. Влияние природно-климатических и гидрологических условий, литологический состав слагающих бассейн Курагана горных пород определяют формирование ультрапресных, нейтральных до слабощелочных кальциевых вод. В реках и озерах минерализация — 28–7 мг/л, рН — 8,5–6,8, в талых водах снега и фирна — 14–2 мг/л, рН — 8,4–6,5. Суммарное содержание растворенных форм элементов не превышает 11 мг/л в реках и озерах и 35 мг/л в талых водах снега и фирна. В снежниках происходит накопление P, K, Ti, Ag, а для речной воды характерно высокое содержание Si, Mo, Te. В некоторых водных объектах установлено превышение ПДК загрязняющих веществ. В реках и озерах концентрации Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb выше ПДК в воде рыбохозяйственных водоемов, а содержание Al, Fe, Ni, Pb выше ПДК в питьевой воде. В талых водах снежников ПДК в рыбохозяйственных водоемах превышены по Al, P, K, Mn, Fe, Cu, Zn, а в питьевой воде — по Al, K, Mn, Sb, Pb. Статистически значимая корреляционная зависимость между всеми элементами в составе воды рек, озер (кроме W) и талых вод снежников свидетельствует об их поступлении из единого природного источника, в основном в результате выщелачивания из горных пород и почв при незначительном влиянии атмосферных осадков. Высокие концентрации токсичных элементов в водных объектах обусловлены стоком веществ с водосборной площади, накоплением продуктов выветривания в снежниках и не связаны с антропогенным загрязнением.

Ключевые слова: метод масс-спектрометрии, тяжелые металлы, р. Кураган, охраняемые природные территории.

E.V. BORODINASobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
630090, Novosibirsk, pr. Akademika Koptuyuga, 3, Russia, borev@igm.nsc.ru**ECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES WITHIN THE KURAGAN BASIN
(ALTAI MOUNTAINS)**

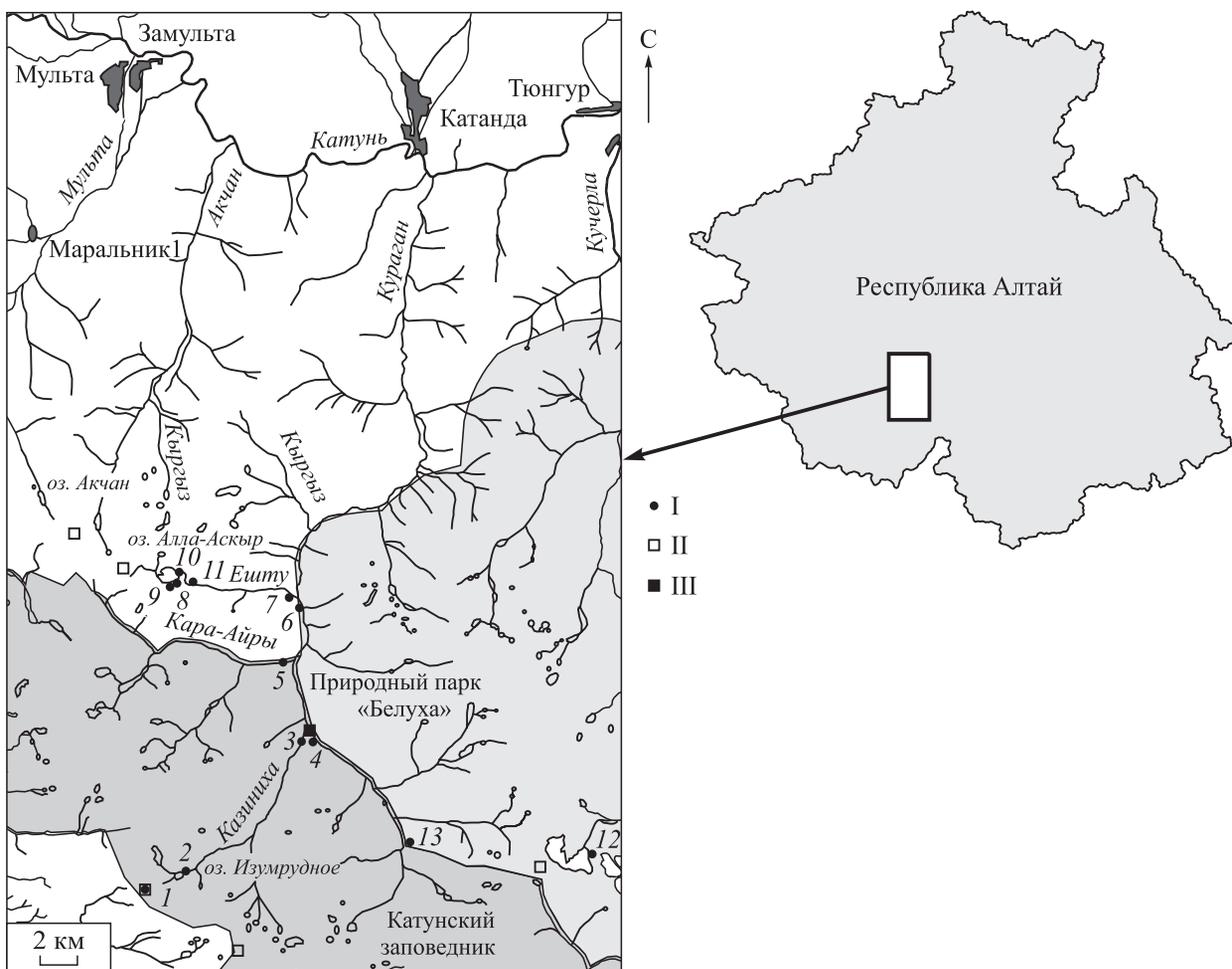
Results of quantitative determination of dissolved forms of 55 elements by mass-spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS) in the water of small rivers, lakes and in the melt waters of glaciers and snowfields of the Kuragan basin are presented. The influence of climatic and hydrological conditions, the lithological composition of the rocks composing the Kuragan basin predetermine the formation of ultra-fresh, neutral to slightly alkaline calcium waters. In rivers and lakes, a mineralization is 28–7 mg/L, pH is 8.5–6.8; in melt waters of snow and firn, they are 14–2 mg/L and pH is 8.4–6.5, respectively. The total content of dissolved forms of elements does not exceed 11 mg/L in rivers and lakes and 35 mg/L in melt water of snow and firn. P, K, Ti and Ag accumulate in snowfields, while the river water is characterized by a high content of Si, Mo and Te. In some water bodies, the excess of the maximum permissible concentration (MPC) of pollutants has been established. In rivers and lakes, the concentrations of Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo and Pb are higher than the MPC in the water of fishery reservoirs, and the content of Al, Fe, Ni and Pb is higher than the MPC in drinking water. In the melt waters of snowfields, the MPCs in fishery reservoirs are exceeded for Al, P, K, Mn, Fe, Cu and Zn, and the MPC in drinking water — for Al, K, Mn, Sb and Pb. A statistically significant correlation between all elements in the composition of the water of rivers, lakes (except for W), and melt water from snowfields indicates their input from a single natural source, mainly as a result of leaching from rocks and soils with a slight effect of atmospheric precipitation. High concentrations of toxic elements in water bodies are due to the runoff of substances from the catchment area and to the accumulation of weathering products in snowfields and are not associated with anthropogenic pollution.

Keywords: mass spectrometry method, heavy metals, Kuragan river, protected natural areas.

ВВЕДЕНИЕ

Исследуемая территория расположена в Центрально-Алтайской физико-географической провинции, на северном макросклоне Катунского хребта, и относится к Холзунско-Чуйской структурно-фациальной зоне. Данный район находится в Усть-Коксинском районе Республики Алтай. Кураган, крупный правый приток р. Катунь, впадает в Катунь в 442 км от ее устья. Длина р. Кураган — 51 км, площадь водосборного бассейна — 648 км² [1]. Река Иолдо (верховье Курагана) представляет собой естественную границу, разделяющую территории Катунского биосферного заповедника и природного парка «Белуха» (см. рисунок). Слияние рек Иолдо и Кара-Айры (р. Левая Осиновка) образует Кураган, по которому проходит западная граница парка. Озеро Изумрудное и р. Казиниха находятся в пределах Катунского заповедника, р. Кара-Айры ограничивает заповедник с севера.

Некоторые из изученных водных объектов расположены в высокогорной части бассейна Курагана, и сведения об их экологическом состоянии получены впервые. Большая часть территории бассейна относится к охраняемой зоне, где любая хозяйственная деятельность запрещена. Остальная часть представляет собой горно-таежную область, где находятся промысловые участки местных жителей. Долина Курагана является обычным местом обитания многих, в том числе редких, видов животных.



Картограмма верховьев р. Курагана с притоками, по [23].

I — места отбора проб: 1 — пер. Казинихинский, снег, фирн; 2 — оз. Изумрудное, исток р. Казинихи; 3 — р. Казиниха, устье, кордон «Казиниха»; 4 — р. Иолдо, кордон «Казиниха»; 5 — р. Кара-Айры (Левая Осиновка), устье; 6 — р. Кураган выше устья р. Ешту; 7 — р. Ешту, устье; 8 — оз. Алла-Аскыр, юго-восточный берег; 9 — оз. Алла-Аскыр, юго-восточный берег, снег, фирн; 10 — оз. Алла-Аскыр, исток р. Ешту; 11 — р. Ешту, водопад (800 м от истока); 12 — ледник Иолдо-Айры, снег, фирн; 13 — р. Иолдо (верховья Курагана). II — перевалы; III — кордон Катунского биосферного заповедника «Казиниха».

В верховьях Курагана, в долинах рек Казинихи и Кыргыз, встречаются марал (*Cervus elaphus*), косуля (*Capreolis capreolis*), соболь (*Martes zibellina*), росомаха (*Gulo gulo*), тетерев (*Lyrurus tetrix*), волк (*Canis lupus*), повсеместно на всей территории Катунского заповедника — бурый медведь (*Ursus arctos*) [2].

Изучение экологического состояния мало подверженных антропогенному воздействию водных объектов дает представление о фоновых характеристиках химического состава природных вод данного района. Хотя долина р. Ешту находится за пределами Катунского заповедника, сток загрязняющих веществ с ее территории оказывает влияние на состав воды Курагана, правый берег которого находится в пределах природного парка «Белуха». Несмотря на труднодоступность, реки и озера бассейна Курагана пользуются популярностью среди туристов, причем рекреационная нагрузка на охраняемую и смежную с ней территории ежегодно возрастает. В заповеднике имеются три эколого-познавательных маршрута и две экологические тропы, частично проходящие по его территории [2].

В труднодоступных горно-таежных и горно-ледниковых районах гидрохимическая оценка состояния водных объектов — один из основных показателей геоэкологического состояния территории. Таким образом, актуальность данного исследования связана с необходимостью экологического мониторинга состояния водных объектов особо охраняемых природных территорий Горного Алтая и контроля антропогенной нагрузки на малые реки и озера как на территории Катунского заповедника, так и за его пределами.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Представлены результаты количественного определения 55 элементов в воде рек, озер и в талых ледниковых водах бассейна р. Кураган. Концентрации растворенных форм металлов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), относительная погрешность $\leq 10\%$. Анализ в 2016 и 2018 гг. (пробы В-10-16–В-13-16 и В-12-18–В-21-18) выполнен с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT (фирмы Finnigan MAT, Германия) в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск). Ниже предела обнаружения содержание Ве ($<0,05$ мкг/л) и Au ($<0,001$ мкг/л). Исследования в 2017 г. (пробы В-10-17–В-19-17) выполнены с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500a (США) и атомно-абсорбционного спектрофотометра AA280FS (США) в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН (Новосибирск). Содержание ртути в пробах В-13-18 и В-15-18 ($<0,02$ мкг/л) определялось на ртутном газоанализаторе атомно-абсорбционным методом «холодного пара» с амальгамацией на золотом сорбенте в лаборатории геохимии благородных и редких элементов Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (Новосибирск).

Отбор проб воды проводился с 18 по 21 августа 2016 г., с 21 по 23 июля 2017 г. и с 11 по 14 июля 2018 г. Пробы отбирались в соответствии с нормативными документами [3–5] в местах максимального водообмена. Не допускалось взмучивание донных отложений. В 2016 г. пробы отбирали в чистую одноразовую полиэтиленовую посуду [5–8], в 2017 и 2018 гг. — в стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки (фирмы Corning, США). Емкости и крышки предварительно ополаскивали не менее трех раз отбираемой для анализа водой [3, 9]. На месте отбора пробы фильтровали через мембранные фильтры и консервировали очищенной азотной кислотой, которая использовалась в дальнейшем при выполнении масс-спектрального анализа этих проб.

Пробы снега и фирна отбирали на глубине 10 см в стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки. После этого они были растоплены при комнатной температуре, профильтрованы через мембранные фильтры, законсервированы очищенной азотной кислотой и помещены в такие же стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки, как и пробы воды. Для фильтрации применялись одноразовые шприцевые фильтрующие насадки Minisart NML (фирма Sartorius, Германия) с размером пор 0,45 мкм. Фильтрат подкислялся до $\text{pH} < 2$ из расчета 3–5 мл концентрированной азотной кислоты на 1 л пробы [4, 6, 7]. Пробы транспортировали в темных контейнерах, хранили в прохладном месте, анализировали не позже 1 мес. с момента отбора [5–7].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ БАСЕЙНА КУРАГАНА

В ходе полевых работ были исследованы основные физико-химические характеристики водных объектов — температура, рН, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, Eh), электропровод-

ность и общая минерализация. Измерения проводились в точках отбора проб с помощью приборов: РН-200, ОРР-200 и СОМ-100 (производитель НМ Digital, Южная Корея). Температура воздуха: 22–20 °С (август 2016 г.), 21–12 °С (июль 2017 г.), 19–7 °С (июль 2018 г.). Температура воды: 12–5 °С (август 2016 г.), 14–9 °С (июль 2017 г.), 10–5 °С (июль 2018 г.). Минерализация и электропроводность воды в реках и озерах составляли: 28–8 мг/л, 43–12 мкСм (август 2016 г.); 20–7 мг/л, 31–11 мкСм (июль 2017 г.) соответственно; в июле 2018 г. минерализация — 21–8 мг/л.

Значение рН воды рек и озер варьировало незначительно: 8,0–7,1 (август 2016 г.), 8,5–7,3 (июль 2017 г.), 8,0–6,8 (июль 2018 г.). Величина ОВП, напротив, менялась в широких пределах: 187–179 мВ (август 2016 г.), 142–65 мВ (июль 2017 г.), 155–22 мВ (июль 2018 г.). Физико-химические показатели талых снеговых и ледниковых вод были следующими: минерализация и электропроводность — 14 мг/л, 22 мкСм (август 2016 г.); 9–6 мг/л, 15–10 мкСм (июль 2017 г.); 11–2 мг/л (июль 2018 г.) соответственно. Значение рН и ОВП — 6,5 и 233 мВ (август 2016 г.); 8,4–8,2 и 165–162 мВ (июль 2017 г.); 8,2–7,8 и 73–37 мВ (июль 2018 г.) соответственно.

В табл. 1 и 2 приведены концентрации растворенных форм элементов в водных объектах бассейна р. Кураган. В реках и озерах общее их содержание не превышает 10,7–2,6 мг/л, в талых водах снега и фирна — 35,1–2,3 мг/л. Максимальное содержание элементов характерно для фирна ледника Иолдо-Айры (35,1 мг/л), минимальное — для воды высокогорного ледникового озера Алла-Аскыр (2,7–2,6 мг/л) и талой воды снежников на его берегах (2,3 мг/л). В восточной его части озерная вода промывает морену, формируя исток р. Ешту. Вероятно, поэтому суммарное содержание элементов в истоке реки (4,5 мг/л) выше, чем ниже по течению (2,9 мг/л) и в ее устье (3,9 мг/л). Максимальное содержание растворенных элементов (11 мг/л) зафиксировано в р. Иолдо. Ее истоки вытекают из-под мощных ледниковых отложений, химические компоненты которых, растворяясь в воде, повышают ее минерализацию. Ниже по течению реки содержание элементов уменьшается — 7 мг/л (р. Иолдо в районе кордона «Казиниха»), и далее — 5,9 мг/л в р. Курагане (выше устья р. Ешту) после смешения с водой р. Кара-Айры (4,2 мг/л), крупного левого притока Курагана.

Согласно результатам, вода в бассейне Курагана ультрапресная, нейтральная до слабощелочной, относится к кальциевой группе. Содержание Са по отношению к другим ионам в реках и озерах — 74–35 %. Содержание основных ионов в порядке убывания: Са > Si > Na > К > Mg > Fe > Ni > Al > Sr > P > Zn > Mn. Их суммарное содержание составляет 99,9–99,8 % от общего количества. В талых водах снега и фирна преобладающим компонентом является К — 80–45 %. Катионы с наибольшими концентрациями: К > Na > Si > Mg > Al > Fe > Ca > P > Zn > Mn > Ti > Pb — в сумме составляют 99,9–99,8 %.

Для химического состава рек и озер по сравнению со снежниками характерно более высокое содержание Si (в 4–1 раз), Мо (в 35–1), Те (в 3–1 раз), вероятно, за счет выщелачивания из подстилающих горных пород и почв. При этом в снежниках происходит накопление Р (в 76–3 раза по сравнению с реками и озерами), К (в 221–2), Ti (в 18–1), Ag (в 24–8 раз). Вещества аккумулируются в снежниках в течение длительного времени как за счет атмосферного выпадения, так и за счет выветривания подстилающих горных пород. Процессы преобразования снежного покрова в фирн связаны с многократным испарением и конденсацией на его поверхности, а также с таянием и повторным замерзанием воды в теплое время года [10, с. 117]. Во время такого преобразования менее подвижные (по сравнению с Na) элементы, например К, сорбируются на высокодисперсных частицах почв и пород в составе фирна [11], что объясняет повышенную концентрацию К в исследованных пробах (в 16–3 раза выше, чем у Na) (см. табл. 1 и 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические особенности поверхностных вод определяются своеобразием ландшафтно-биогеохимической обстановки водосборных территорий и обусловлены их геоморфологическими и литологическими особенностями, составом и свойствами почв и почвообразующих пород [12]. В геологическом строении района исследований участвовали среднекембрийские и нижнеордовикские флишоидно-терригенные и карбонатно-терригенные отложения, прорванные девонскими гранитоидами. В верховьях р. Иолдо обнаружено связанное с ними жильно-штоковерковое грейзеновое рудопроявление Мо. В нижней части долины Курагана в коренных породах отмечены литохимические площадные ореолы рассеяния Cu, Ni, Sn и площадные шлиховые ореолы рассеяния Au. [13]. Водоносный горизонт бассейна Курагана относится к амгинско-тремадокской водоносной зоне, представленной песчаниками, алевритами, сланцами, аргиллитами, конгломератами, гравелитами [14].

Таблица 1

Результаты определения содержания растворенных форм элементов в водных пробах методом ИСП-МС, мкг/л (2017 г.)

Элемент	Номер пробы										
	В-10-17	В-11-17	В-12-17	В-13-17	В-14-17	В-15-17	В-16-17	В-17-17	В-18-17	В-19-17	ПО-17
Li	0,35	0,20	0,26	0,26	0,34	0,39	0,76	0,04	0,26	0,19	0,001
Al	140	15	12	7,7	84	53	160	—	130	1,4*	1
Sc	0,08	0,03	0,22	0,31	0,12	0,12	0,09	—	0,12	—	0,001
Ti	1,2	—	—	—	6,3	1,5	4,4	0,38	3,5	1,6	0,001
V	0,32	0,14	0,15	0,14	0,26	0,23	0,15	—	0,30	—	0,01
Cr	0,50	—	—	—	—	—	2,1	—	0,19	—	0,001
Mn	3,8	0,82	0,45	0,48	3,5	3,8	2,5	0,20	3,6	1,2	0,001
Fe	150	30	34	26	140	45	100	6,5	190	35	0,1
Co	0,18	—	—	—	—	0,06	0,05	0,10	0,15	0,09	0,01
Ni	1,1	—	0,40	0,27	1,2	9,8	5,8	—	—	—	0,1
Cu	1,7	0,56	0,36	0,91	1,6	2,0	5,8	—	—	—	0,1
Zn	44	2,4	—	0,99*	1,7*	6,4	12	—	—	—	1
Ga	0,06	0,18	0,06	0,12	0,30	0,12	0,96	—	0,05	—	0,001
Ge	—	—	—	—	0,15	—	0,18	—	—	—	0,001
Br	—	8,3	2,8	7,5	6,3	11	7,1	—	—	—	0,001
Rb	1,2	0,32	0,44	0,33	0,69	0,44	0,37	0,23	0,78	0,31	0,001
Sr	0,6*	7,5	11	20	8,5	16	7,2	3,2	—	3,1	1
Y	0,09	—	0,02	—	0,05	0,03	0,07	0,10	0,16	0,08	0,001
Zr	0,15	—	—	—	—	—	0,63	—	0,02	—	0,001
Nb	—	—	—	—	—	—	0,25	—	—	—	0,001
Mo	0,16	0,19	0,52	0,39	0,65	0,72	16	—	—	—	0,01
Ag	—	—	—	—	—	—	6,5	—	—	—	0,01
Cd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,18	0,005
In	—	—	—	—	0,03	—	—	—	—	—	0,001
Sn	—	—	—	—	—	0,22	1,2	—	—	—	0,005
Sb	0,17	—	—	—	—	—	0,52	—	—	—	0,005
I	1,1	1,8	2,7	1,3	1,8	1,4	1,4	—	—	—	0,001
Ba	1,6	1,3	2,5	2,1	3,6	2,1	15	—	—	—	0,1
La	0,28	0,21	—	0,16	0,49	1,9	4,5	—	—	—	0,001
Ce	0,54	0,20	0,03	0,10	0,17	0,03	0,39	0,61	0,91	0,36	0,001
Pr	0,03	0,03	—	—	0,03	—	—	0,02	0,08	0,04	0,001
Nd	—	—	—	—	—	—	—	0,24	0,56	0,34	0,001
Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	0,05	—	0,001
Eu	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,02	—	0,001
Gd	—	—	—	—	—	—	—	0,05	0,07	—	0,001
Tb	—	—	—	—	—	—	—	—	0,01	—	0,001
Dy	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	—	0,001
Er	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	—	0,001
Yb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,04	0,001
Ta	—	—	—	—	—	—	—	0,09	—	0,01	0,001
W	—	—	0,33	—	—	—	0,24	—	—	—	0,005
Re	0,18	0,37	0,14	0,23	0,31	0,23	0,23	—	—	—	0,001
Pt	—	0,15	—	—	—	—	—	—	—	—	0,001
Au	—	—	—	—	—	—	0,15	—	—	—	0,0005
Pb	4,2	0,43	0,47	1,1	0,49	1,9	7,7	—	5,0	0,66	0,01
Bi	0,12	0,07	0,18	0,07	—	0,08	0,62	0,93	0,95	0,81	0,0005
Th	0,04	—	—	—	—	—	0,04	—	—	—	0,001
U	—	0,05	0,27	0,10	0,21	0,14	0,06	—	0,01	0,09	0,001

Примечание. Здесь и в табл. 2. * Концентрации элементов близки к пределу обнаружения, погрешность до 100 % (данные по содержанию этих элементов следует считать оценочными). Жирным шрифтом выделены показатели,

превышающие ПДК. Места отбора проб: В-10-17, В-12-18 – перевал Казинихинский, снег, фирн; В-11-17, В-13-18 – оз. Изумрудное, исток р. Казинихи; В-12-17, В-14-18 – р. Казиниха, устье, кордон «Казиниха»; В-13-17, В-15-18 – р. Иолдо, кордон «Казиниха»; В-14-17, В-16-18 – р. Кара-Айры (Левая Осиновка), устье; В-15-17, В-17-18 – р. Кураган выше устья р. Ешту; В-16-17, В-18-18 – р. Ешту, устье; В-17-17, В-13-16, В-20-18 – оз. Алла-Аскыр, юго-восточный берег; В-18-17, В-21-18 – оз. Алла-Аскыр, юго-восточный берег, снег, фирн; В-19-17, В-19-18 – оз. Алла-Аскыр, исток р. Ешту; ПО-17 – пределы обнаружения для анализов, выполненных в 2017 г. (пробы В-10-17 – В-19-17); В-10-16 – ледник Иолдо-Айры, снег, фирн; В-11-16 – р. Иолдо (верховье Курагана); В-12-16 – р. Ешту, водопад (800 м от истока); ПО-16 – пределы обнаружения для исследований, выполненных в 2016 г. (пробы В-10-16–В-13-16); ПО-18 – пределы обнаружения для исследований, выполненных в 2018 г. (пробы В-12-18–В-21-18).

Для долины Курагана характерны все основные виды ландшафтов горной страны, а их распределение подчинено высотной зональности. В высотном диапазоне 2500–2300 м преобладает гляциально-нивальный комплекс, включающий ледник Иолдо-Айры в верховьях р. Иолдо и снежники на гребнях Катунского хребта, в верхней части долины р. Ешту. Вблизи снеговой линии в альпийском поясе расположены ледниковые озера подпрудного происхождения – Изумрудное и Алла-Аскыр. Крупновалунные осыпи – курумы, зона каменистых и мохово-лишайниковых тундр со снежниками по берегам озер – сменяются низкотравными альпийскими лугами и ерниковыми тундрами из березки карликовой, местами заболоченными. Для субальпийского пояса характерны лиственнично-кедровые редколесья с фрагментами среднетравных и крупнотравных субальпийских лугов и кустарников. Лесной пояс представлен хвойными елово-лиственнично-кедровыми и смешанными лесами, захламленными ветровалом и буреломом, в том числе после мощных лавин на крутых склонах гор, со старыми гарями, с развитым травостоем и густыми труднопроходимыми зарослями кустарников, в том числе жимолости, смородины, малины.

Истоки р. Иолдо и ее притоков расположены в подгольцовой части хребтов, в зоне тундр, альпийских и субальпийских лугов со слабо выраженным почвенным покровом, сформированным на каменистых россыпях и скалах. В верховьях рек Ешту и Кара-Айры преобладают высокогорные дерново-гольцовые почвы, в меньшей степени развиты горно-луговые дерновые. В долинах рек Иолдо, Казинихи и Кара-Айры низины заняты горно-луговыми дерновыми почвами под субальпийскими лугами и лиственнично-кедровыми лесами, а гребни и гривы, крутые склоны – каменистыми россыпями. В долине Курагана распространены главным образом подбуры таежные в среднем течении реки и бурые лесные кислые почвы в нижней части долины под преимущественно хвойными лесами с кедром, лиственницей, пихтой, елью. Почвообразующими породами в бассейне Курагана во всех случаях были сланцы и песчаники [15].

Исходный химический состав природных вод определяют атмосферные осадки, выпадающие в бассейнах рек. Последующее обогащение химического состава речных вод происходит в результате поверхностного и подземного стока, фильтрации осадков через почвенный покров, поступления в них трещинных вод из пород геологического основания [16]. В питании верховьев рек бассейна Курагана преобладают ледниковые воды и дождевые осадки. Континентальный климат с длительной холодной зимой и коротким умеренно теплым летом, круглогодичные мерзлотные явления в высокогорных тундровых почвах способствуют формированию низкоминерализованных вод данного района. В долине Курагана и нижнем течении его притоков возрастает роль подземного стока, а воды, попадающие в реку с водосбора, дренируют более мощный, чем в верховьях, подстилающий почвенно-грунтовый слой, что способствует увеличению минерализации водотоков и обогащению их растворимыми компонентами почв и почвообразующих пород. Рельеф территории бассейна Курагана, резко пересеченный, с крутыми склонами и водоразделами, а также достаточное количество осадков обуславливают высокий уровень водообмена, что увеличивает интенсивность процессов выветривания и выноса продуктов выщелачивания пород и почв. Локально, при промывании речными и грунтовыми водами морен и заболоченных участков, происходит значительное повышение минерализации вод и их обогащение элементами, в том числе тяжелыми металлами, вплоть до концентраций, превышающих предельно допустимые нормы.

Концентрации растворенных форм некоторых элементов в воде бассейна Курагана превышают нормативы ПДК как в рыбохозяйственных водоемах, так и в питьевой воде (табл. 3). Река Казиниха вытекает из оз. Изумрудного и в нижнем течении, прорезая узкое ущелье, мощным потоком впадает в р. Иолдо. Общее содержание растворенных в воде веществ в устье реки, а также концентрации всех элементов, кроме Al, в нижнем течении закономерно выше, чем в ее истоке. Наибольшее содержание характерно для тяжелых металлов Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, W, U, причем содержание Fe и Ni выше ПДК (см. табл. 3).

Таблица 2

Результаты определения содержания растворенных форм элементов в водных пробах методом ИСП-МС, мкг/л (2016 и 2018 гг.)

Элемент	Номер пробы														ПО-18	
	В-10-16	В-11-16	В-12-16	В-13-16	ПО-16	В-12-18	В-13-18	В-14-18	В-15-18	В-16-18	В-17-18	В-18-18	В-19-18	В-20-18		В-21-18
Na	1716	522	389	290	10	906	217	362	490	328	446	561	350	336	226	5
Mg	3185	724	185	163	3	157	179	226	473	221	339	273	257	240	176	3
Al	99,4	321	12	17	5	206	29	18	29	24	15	11	21	18	237	3
Si	114*	1045	623	484	100	277	284	475	598	447	554	931	514	485	289	100
P	79,6	27	4	3*	2	331	7	8	5	6	8	6	7	8	100	1
K	28141	578	300	274	30	2539	127	237	228	256	465	296	133	187	1007	20
Ca	1539	7036	1351	1318	500	202	2290	3256	5207	2859	4067	1837	1586	1391	<200	200
Sc	<0,01	0,01*	<0,01	<0,01	0,01	0,01*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Ti	2,7*	3	<1	<1	1	3,1	0,3	0,4	0,3	1,0	0,4	0,2	0,7	0,3	3,8	0,1
V	0,32	0,7	<0,1	0,1*	0,1	0,39	0,12	0,21	0,17	0,20	0,19	0,15	0,77	0,08	0,36	0,03
Cr	0,63	0,7	<0,2	<0,2	0,2	0,67	0,12	0,54	0,11	0,16	0,44	0,06*	3,42	0,15	0,36	0,05
Mn	61,9	14,2	0,6	0,7	0,2	4,5	0,5	1,8	0,4	0,7	0,5	0,4	12,0	1,5	5,6	0,1
Fe	103	303	9*	6*	5	217	12	124	7	24	12	4,4*	1334	13	204	3
Co	0,33	0,21	<0,05	<0,05	0,05	0,11	0,01*	0,01*	<0,01	0,02*	0,01*	0,01*	0,08	0,01*	0,11	0,01
Ni	—	<0,5	<0,5	<0,5	0,5	0,9	0,2*	23,6	0,1*	<0,1	0,1*	<0,1	282	0,3	0,6	0,1
Cu	2,80	2,2	<0,25	<0,25	0,25	1,6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	2,1	0,7	0,8	0,2
Zn	67,0	51	10	5	1	8,7	1,4	6,0	0,9	1,1	1,1	0,8	12,4	2,3	9,7	0,3
Rb	1,93	0,8	0,4	0,4	0,1	0,85	0,36	0,44	0,35	0,51	0,45	0,45	0,36	0,36	0,45	0,05
Sr	9,0	51	6	5	1	0,9*	8,4	9,9	23,5	9,1	16,6	6,5	5,3	4,9	0,6*	0,5
Mo	0,17	0,31	0,54	0,48	0,01	0,02	0,17	0,34	0,56	0,27	0,43	0,71	0,36	0,27	0,02	0,01
Ag	—	—	—	—	—	0,76	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,24	0,01
Cd	0,07	0,03	<0,01	0,03	0,01	0,025	<0,003	<0,003	0,004*	<0,003	<0,003	0,006*	0,007	0,006*	0,008	0,003
Sn	—	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,05*	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
Sb	5,8	0,37	1,13	0,80	0,005	0,058	0,031	0,045	0,041	0,029	0,041	0,017	0,038	0,029	0,048	0,005
Te	0,010	0,01	<0,001	0,03	0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Ba	16,4	7,6	1,2	1,1	0,1	1,6	1,5	1,8	1,7	1,8	1,7	1,3	1,4	1,5	1,4	0,1
W	0,02*	0,02	0,05	0,04	0,01	0,02*	0,02	0,14	0,07	0,06	0,11	0,16	0,06	0,02	<0,01	0,01
Pb	0,54	8,0	0,16	0,05*	0,05	3,6	<0,1	0,2*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1*	0,1*	3,4	0,1
Bi	0,007	0,028	0,003	<0,001	0,001	0,049	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002*	0,002*	0,037	0,001
U	0,060	0,20	0,04	0,07	0,001	0,02	0,06	0,20	0,15	0,15	0,172	0,082	0,034	0,034	0,016	0,001
Сумма	35147	10698	2884	2560	—	4862	3158	4751	7065	4181	5929	3927	4524	2691	2265	—

Кратность превышения ПДК в водных объектах бассейна Курагана

Компонент	Дата отбора проб и номер пробы											
	18.08.16 В-10-16	18.08.16 В-11-16	21.08.16 В-12-16	21.07.17 В-10-17	22.07.17 В-14-17	22.07.17 В-15-17	22.07.17 В-16-17	23.07.17 В-18-17	11.07.18 В-12-18	13.07.18 В-14-18	14.07.18 В-19-18	14.07.18 В-21-18
Al [17]	2,5	8,0	—	3,5	2,1	1,3	4,0	3,3	5,2	—	—	5,9
Al [18, 19]	—	1,6	—	—	—	—	—	—	1,0	—	—	1,2
Al [19]	—	3,2	—	1,4	—	—	1,6	1,3	2,1	—	—	2,4
P [17]	1,6	—	—	—	—	—	—	—	6,6	—	—	2,0
K [17]	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K [20, 21]	2,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K [19]	14,1– 1,4	—	—	—	—	—	—	—	1,3	—	—	—
Mn [17]	6,2	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2	—
Mn [19]	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe [17]	1,0	3,0	—	1,5	1,4	—	1,0	1,9	2,2	1,2	13,3	2,0
Fe [18, 19, 22]	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	4,4	—
Ni [17]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,4	28,2	—
Ni [18, 19]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2	14,1	—
Cu [17]	2,8	2,2	—	1,7	1,6	2,0	5,8	—	1,6	—	2,1	—
Zn [17]	6,7	5,1	1,0	4,4	—	—	1,2	—	—	—	1,2	—
Sb [18, 19]	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mo [17]	—	—	—	—	—	—	16,0	—	—	—	—	—
Pb [17]	—	1,3	—	—	—	—	1,3	—	—	—	—	—
Pb [19]	—	1,6	—	—	—	—	1,5	1,0	—	—	—	—

Примечание. Места отбора проб: В-10-16 – ледник Иолдо-Айры, снег, фирн; В-11-16 – р. Иолдо (верховье Курагана); В-12-16 – р. Ешту, водопад (800 м от истока); В-10-17, В-12-18 – перевал Казинихинский, снег, фирн; В-14-17 – р. Кара-Айры (Левая Осиновка), устье; В-15-17 – р. Кураган выше устья р. Ешту; В-16-17 – р. Ешту, устье; В-18-17, В-21-18 – оз. Алла-Аскыр, юго-восточный берег, снег, фирн; В-14-18 – р. Казиниха, устье, кордон «Казиниха»; В-19-18 – оз. Алла-Аскыр, исток р. Ешту.

Река Ешту берет начало из оз. Алла-Аскыр и впадает в Кураган на заболоченной низине. В верхнем течении река проходит через морену, расположенную вдоль восточного берега озера и перегораживающую ее русло. Растворимые компоненты химического состава моренных отложений активно переходят в водные растворы, повышая их минерализацию и концентрацию отдельных элементов — с 2,7 мг/л в оз. Алла-Аскыр до 4,5 мг/л в истоке р. Ешту. Содержание растворенных в воде элементов в истоке реки выше, чем в устье: Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sb (концентрации Mn, Fe, Ni, Cu, Zn выше ПДК). Концентрации других элементов, напротив, в устье реки выше, чем в истоке, в результате их последовательного поступления из дренируемых отложений: Na, Si, K, Mo, W, U.

Истоки р. Иолдо формируются на заболоченном высокогорном плато и затем промывают мощные моренные отложения, увеличивая минерализацию вод, а потому содержание большинства элементов, за исключением W, в верхнем течении реки выше, чем в среднем. Наибольшие концентрации металлов, вероятно, связаны с их выщелачиванием из моренных отложений, а также пород и почв в заболоченной верхней части долины: Al, Ti, V, Mn, Fe, Cu, Zn, Ba, Pb (содержание Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb выше ПДК).

В ледниках и снежниках Катунского хребта содержание вредных веществ — Al, P, K, Mn, Fe, Cu, Zn, Sb, Pb — превышает установленные нормативы ПДК (см. табл. 1–3).

Матрицы парных корреляций использовались для выявления связи между концентрациями элементов в водных объектах бассейна Курагана. Для рек и озер установлены статистически значимые ($r > 0,7$) корреляционные связи между элементами Li, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Br, Rb, Sr, Y, Mo, Cd, Sb, I, Ba, La, Ce, Pr, Re, Pb, Bi, U. Такая корреляционная зависимость может указывать на существование единых источников поступления этих элементов.

Содержание W не имеет корреляционной связи с концентрациями других элементов. Для талых вод снежников выявлены корреляционные связи ($r > 0,7$) между всеми изученными элементами: Na, Mg, Al, P, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Mo, Cd, Sb, Ba, Pb, Bi, U.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная в данной работе информация дает представление о естественных геохимических процессах в нетронутой окружающей среде Катунского заповедника и смежной с ним территории. Изучены фоновые характеристики химического состава природных вод, который обусловлен климатическими, геоморфологическими и литологическими особенностями территории, составом почв и почвообразующих пород водосборного бассейна. В результате проведенных исследований выявлено, что поверхностные воды в бассейне Курагана ультрапресные, нейтральные до слабощелочных. В химическом составе речной и озерной воды значительно преобладает Ca (74–35 %), в талых водах снега и фирна — K (80–45 %). В снежниках происходит накопление P, K, Ti, Ag, для речной воды характерно высокое по сравнению со снежниками содержание Si, Mo, Te.

Концентрации растворенных форм некоторых элементов в воде бассейна Курагана превышают нормативы ПДК как в рыбохозяйственных водоемах, так и в питьевой воде. В реках и озерах бассейна Курагана установлены высокие концентрации Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb, превышающие ПДК в воде рыбохозяйственных водоемов, а также Al, Fe, Ni, Pb, превышающие ПДК в питьевой воде. В талых водах снежников ПДК в рыбохозяйственных водоемах превышены по Al, P, K, Mn, Fe, Cu, Zn, а ПДК в питьевой воде — по Al, K, Mn, Sb, Pb.

Статистически значимые ($r > 0,7$) корреляционные связи между всеми, кроме W, элементами в составе воды рек и озер свидетельствуют об их поступлении из единого природного источника, главным образом в результате выщелачивания из горных пород и почв при незначительном влиянии атмосферных осадков. Установлены корреляционные связи между всеми изученными элементами для талых вод снежников. Эта корреляционная зависимость может означать, что источником элементов, вероятно, являются подстилающие материнские горные породы и почвы, откуда продукты выветривания попадают в снежники механическим путем или посредством атмосферного переноса. Процессы такого выветривания приводят к накоплению в снежниках токсичных элементов (Al, Mn, Sb, Pb). Выщелачивание из почв и пород растворимых компонентов, содержащих Al, Fe, Ni, Pb, также повышает их концентрации в воде некоторых рек и озер до значений выше предельно допустимых в питьевой воде. Al, Sb, Pb относятся ко второму санитарно-токсикологическому классу опасности, Mn, Fe, Ni — к третьему. Превышающие ПДК концентрации элементов в водных объектах бассейна Курагана обусловлены природными факторами, являются фоновыми для данного района и не связаны с антропогенным загрязнением Катунского заповедника и смежной с ним территории рекреационного использования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ресурсы** поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1: Горный Алтай и Верхний Иртыш / Отв. ред. В.В. Зееберг. — Л.: Гидрометеоздат, 1966. — 216 с.
2. **Катунский** биосферный заповедник: Труды Катун. биосфер. заповедника. Летопись природы. — Усть-Кокса, 2008. — Вып. 10. — 245 с.
3. **Борисова Е.А.** Анализ воды: метод. пособие. — Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 2013. — 30 с.
4. **МУ 1.2.2743-10.** Порядок отбора проб для выявления и идентификации наноматериалов в водных объектах. Методические указания [Электронный вариант]. — <https://docs.cntd.ru/document/1200090917> (дата обращения 20.07.2020).
5. **Р 52.24.353-2012.** Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Рекомендации. — Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2012. — 35 с.
6. **ГОСТ 31861-2012.** Вода. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2013. — 36 с.
7. **ГОСТ 31870-2012.** Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии. Межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2013. — 18 с.

8. Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лежнев А.Е., Носенко С.В., Золотарёва Н.И., Москвина И.Р. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2007. — Т. 73, № 1. — С. 12–22.
9. МУК 4.1.1469-03. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в питьевой, природных и сточных водах [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/120003484810> (дата обращения 10.08.2020).
10. Фролова Н.Л., Повалишников Е.С., Ефимова Л.Е. Комплексные исследования водных объектов Горного Алтая (на примере бассейна р. Мульта) — 75 лет спустя // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2011. — № 2. — С. 113–126.
11. Гусева Т.В., Заика Е.А., Виниченко В.Н., Молчанова Я.П., Аверочкин Е.М. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. Справочные материалы. — М.: Изд-во Соц.-экол. союза, 2000. — 148 с.
12. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачёв И.В. Содержание и распределение основных макро- и микроэлементов в поверхностных водах Алтая // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 3. — С. 298–310.
13. Карта полезных ископаемых Республики Алтай. М-б 1:1 000 000 / [Электронный ресурс]. — <https://www.geokniga.org/mapgroups/7897?page=2> (дата обращения 15.09.2020).
14. Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И., Шокальский С.П. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Алтай-Саянская. Л. М-45. Горно-Алтайск. Объяснительная записка. — СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2011. — 567 с.
15. Национальный атлас почв Российской Федерации / Ред. С.А. Шоба. — М.: Астрель; АСТ, 2011. — 632 с.
16. Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В. Гидрогеохимическое районирование речной сети Камчатки // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 2. — С. 182–195.
17. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 18.01.2010 № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [Электронный ресурс]. — <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2070984/> (дата обращения 15.09.2020).
18. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/901862249> (дата обращения 15.09.2020).
19. СанПиН 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. — М.: Минздрав России, 2002. — 40 с.
20. Директива 80/778/ЕЕС от 15.07.1980 о качестве питьевой воды, предназначенной для употребления человеком // Журн. Европейского союза [Электронный ресурс]. — <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31980L0778> (дата обращения 15.09.2020).
21. Директива 98/83/ЕС от 03.11.1998 о качестве воды, предназначенной для употребления человеком // Журн. Европейского Союза [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/456029632> (дата обращения 15.09.2020).
22. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. — М.: Минздрав России, 2002. — 67 с.
23. Топографическая карта М-45-77. М-б 1:100 000 [Электронный ресурс]. — <http://mapm45.narod.ru/map1/im45077.html> (дата обращения 20.07.2020).

Поступила в редакцию 09.03.2021

После доработки 01.07.2021

Принята к публикации 29.12.2021