

Морские, речные и озёрные льды

УДК 549.28:551.326.83 (282.257.5)

DOI: 10.31857/S2076673422020130, EDN: EPAOX5

Содержание тяжёлых металлов во льду нижнего течения реки Амур

© 2022 г. А.Н. Махинов*, В.И. Ким, А.Ф. Махинова, Д.В. Матвеевко

Институт водных и экологических проблем
Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, Хабаровск, Россия
*amakhinov@mail.ru

Heavy metal content in ice in the lower Amur River

A.N. Makhinov*, V.I. Kim, A.F. Makhinova, D.V. Matveenko

Institute for Water and Ecology Problems,
Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia
*amakhinov@mail.ru

Received June 30, 2021 / Revised February 9, 2022 / Accepted April 1, 2022

Keywords: *Amur River, ice varieties, heavy metal distribution.*

Summary

For the first time, the content of heavy metals in the river ice in the lower Amur River has been analyzed, taking into account the stratigraphic heterogeneity of the ice structure in the river channel. According to the conditions of origin and duration of formation, the main varieties of ice were identified – layered frozen ice, naled-type (icing) ice, and hummocky ice. The most widespread in the Amur ice cover is ice consisting of layers forming hummocky-frozen, hummocky-naled and homogeneous frozen ice sequences. The aim of the study was to determine the content of heavy metals in different ice varieties and the possibility of using this data to assess river pollution during the winter period. The highest content of heavy metals was found in the naled ice, which is due to its formation on the ice surface contaminated during the winter. The minimum content was found in the layered frozen ice, which is formed throughout the winter due to accretion from below. In the layers of hummocked ice formed for several days during the autumn ice drift, metals have average content and uniform distribution within the entire thickness. Influence of Khabarovsk city in winter period is most noticeable by the content of metals in the frozen variety of Amur river ice near its right bank, where the city is located. High concentrations were noted for Pb and Zn, and less pronounced for Cu and Ni. Ice is more informative object than water under the ice, and its chemical composition can serve as an indicator of the ecological state of the river during the freezing period.

Citation: Makhinov A.N., Kim V.I., Makhinova A.F., Matveenko D.V. Heavy metal content in ice in the lower Amur River. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (2): 251–260. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422020130, edn: epaoxs.

Поступила 30 июня 2021 г. / После доработки 9 февраля 2022 г. / Принята к печати 1 апреля 2022 г.

Ключевые слова: *река Амур, разновидности льда, распределение тяжёлых металлов.*

Установлено содержание тяжёлых металлов в речных льдах различного происхождения в нижнем течении р. Амур в окрестностях г. Хабаровск. Ледяной покров реки представлен сочетаниями трёх разновидностей льда: намёрзшим, наледным и торосистым, которые различаются по условиям формирования, строению и распределению в них тяжёлых металлов. Повышенные содержания металлов во льду в зоне влияния города позволяют использовать их в качестве показателя экологического состояния реки во время ледостава.

Введение

Химический состав природных вод формируется под влиянием различных природных и антропогенных факторов, специфичных для разных регионов страны. Эпизодические гидрохимические исследования на реках

Дальнего Востока показали существенную пространственно-временную неоднородность содержания в воде различных химических веществ, прежде всего тяжёлых металлов [1, 2]. Сложное распределение металлов было установлено в реке Амур в связи со значительной шириной водного потока [3]. Изучение распределения

загрязняющих ингредиентов в широком речном русле имеет большое практическое значение, так как позволяет оценить влияние промышленных стоков и техногенных аварий на качество воды в условиях её слабого перемешивания в поперечном сечении, характерного для крупных рек. Вместе с тем сезонность влияния экологических факторов на гидрохимический режим рек определяет актуальность изучения особенностей распределения загрязняющих веществ в руслах рек в зимний период. Река Амур продолжительное время – с середины ноября и до конца апреля – покрыта льдом [4], поэтому особенно важно установить особенности распределения тяжёлых металлов в ледяной толще и зависимости их содержания от концентраций в подлёдной воде.

Гляциохимические процессы, происходящие при образовании ледяного покрова на Амуре, исследованы крайне слабо. Только немногие исследования [5, 6] посвящены вопросам криогенной метаморфизации химического состава природных льдов. Используя лёд как объект специального изучения, были выявлены некоторые особенности химического состава природных льдов на водных объектах Дальнего Востока, в том числе и для Амура [7, 8], однако при этом недостаточно учитывалась неоднородность речного льда. Изучение содержания химических веществ в ледяной толще в зависимости от её стратиграфических особенностей для выявления закономерностей распределения загрязнений по ширине реки и оценки роли антропогенного влияния в их распределении на Амуре раньше не проводилось. Оценка физических характеристик и особенностей строения речного льда необходима при разработке мероприятий по борьбе с ледовыми заторами [9] и для обеспечения безопасной хозяйственной деятельности на реках зимой.

Тяжёлые металлы могут служить надёжным показателем антропогенного влияния на реки, что широко используется в экологических исследованиях. Анализ их содержания в речном льду имеет важное значение для оценки загрязнения водотоков в зимний период, когда массовое получение гидрохимических характеристик воды затруднено. Гляциохимические исследования слоёв ледяной толщи позволяют получить достаточно полную картину динамики содержания металлов за весь период формирования льда в течение зимы.

Геоэкологические исследования речного льда Амура, выполненные в последние годы, выявили неоднородность содержания в нём химических и органических веществ [10]. Изучение процессов аккумуляции и трансформации токсичных веществ во льду показало свою эффективность при оценке влияния на Амур аварии на его крупнейшем притоке – реке Сунгари – осенью 2005 г. [11, 12]. Однако при выполнении подобных работ без учёта стратиграфических особенностей строения ледяной толщи возможна неточная и даже неправильная интерпретация полученных данных, поскольку условия и продолжительность льдообразования её различных слоёв существенно различаются.

Ледяной покров Амура характеризуется разнообразным строением на разных участках реки из-за его формирования под воздействием нескольких факторов – силы и продолжительности осеннего ледохода, наличия и размеров полыней, продолжительности и суровости зимы, активности наледеобразования и др. Таким образом, до настоящего времени изучение особенностей содержания тяжёлых металлов в речном льду Амура проводилось без учёта его стратиграфической неоднородности, обусловленной различным происхождением разных слоёв. Использованию данных о содержании металлов во льду для оценки его загрязнения в условиях антропогенного воздействия на водные экосистемы также не уделялось должного внимания.

Задачи настоящей работы – установить содержание тяжёлых металлов в речном льду реки Амур в зависимости от условий его образования и оценить влияние города Хабаровска на загрязнение льда и воды в зимний период.

Материал и методы

Исследования проводили в нижнем течении Амура, на участке, где река течёт одним руслом. В районе работ русло – прямолинейное, имеет ширину 1200 м и глубину 9–11 м в зимнюю межень. По ширине реки глубины изменяются незначительно, наибольшие отмечаются на середине потока. Ледостав на реке установился 24 ноября 2019 г. Толщина льда к концу зимы составила 100–120 см. Пробы льда и воды отобраны 27 февраля 2020 г. в поперечном створе реки на рассто-

янии 3,0 км ниже г. Хабаровск при максимальной толщине льда, которая отмечается к концу зимы. Непосредственно на месте определяли характер торосистости льда и протяжённость участков с разными его разновидностями по ширине русла. Одновременно измеряли толщину льда, глубину реки, среднюю и максимальную высоту торосов.

С помощью механического кольцевого бура пробурены три скважины — у левого берега (48°38,547' с.ш., 135°04,314' в.д.), на середине реки (48°38,026' с.ш., 135°04,929' в.д.) и вблизи правого берега (48°37,751' с.ш., 135°04,966' в.д.). Из каждой скважины получали керн диаметром 15 см и после осмотра делали его послойное описание. Определяли цвет, прозрачность льда, наличие и характер включений. Одновременно отбирали пробу воды подо льдом в каждой скважине. Для количественной оценки содержания металлов ледяной керн послойно распиливали на части через 15–25 см с учётом стратиграфии льда и характера включений. Из каждого керна отбирали по пять проб с целью выявления наиболее общих изменений в содержании металлов в ледяной толще. Наледную часть в керне льда выделяли по резко выраженному верхнему слою с желтоватым цветом и наличием в нём тёмных хлопьевидных включений. Пробы льда помещали в полиэтиленовые пакеты и доставляли в лабораторию, где их растапливали в стеклянной ёмкости при комнатной температуре и измеряли объём полученной воды. Пробы воды анализировали в аккредитованном аналитическом центре коллективного пользования Института тектоники и геофизики ДВО РАН. Для отделения взвешенной фазы пробы воды фильтровали (под вакуумом) с помощью ядерных фильтров с размером пор 0,45 мкм. В фильтрах, подкисленных HNO_3 до pH 2, определяли элементный состав растворённых форм металлов (Co, Cu, Zn, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb) методом масс-спектрофотометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) (прибор Elan 9000, Канада) по методике ПНДФ 14.1.2:4.135–98.

Основные особенности ледяного покрова р. Амур

Характеристика основных особенностей ледяного покрова Амура в нижнем течении приведена нами ранее в работе [13]. Было показано, что строение ледяного покрова в поперечном профиле русла — неоднородное. Вдоль берегов шири-

ной от нескольких десятков до нескольких сотен метров обычно протягиваются слабо торосистые льды. Далее расположены изолированные друг от друга участки разного размера с ровной ледяной поверхностью, образованной на месте больших полыней, формирующихся во время осеннего ледохода за счёт неплотного смыкания больших ледяных полей. В стрежневой части потока выделяется зона шириной от 50 до 150 м сильно торосистых льдов. Максимальная толщина льда в разные годы колеблется в пределах 1,0–1,5 м. На Амуре в строении ледяной толщи участвуют три разновидности льда по условиям их образования: торосистый, намёрзший и наледный. В зависимости от их сочетаний на разных участках реки образуются разные типы льда: торосистый, торосисто-намёрзший, намёрзший, наледно-намёрзший и др. В зависимости от таких факторов, как уровни и расходы воды, температурные условия, продолжительность и мощность осеннего ледохода, распространение разных типов льда по годам изменяется. Ледяной покров р. Амур зимой 2019/20 г. на участке исследований имел следующие особенности (рис. 1).

Вдоль левого берега образовался слабо торосистый лёд небольшой толщины, лежащий на грунте. Далее в полосе шириной 110 м лёд был сильно торосистый с хаотическим нагромождением смёрзшихся ледяных обломков толщиной 10–12 см. Высота торосов достигала 1,2 м. Обломки имели разные размеры. Лёд содержал многочисленные мелкие воздушные пузырьки, придающие ему матовый оттенок. Значительную часть русла шириной 810 м занимает ровная поверхность, в пределах которой распространён прозрачный однородный лёд, формировавшийся в течение всей зимы на месте обширного участка открытой воды (полынь) в начале ледостава. Ледяная толща разбита густой сетью трещин разной протяжённости и глубины (рис. 2, а). Лёд однородный, стекловидный, прозрачный, без включений (см. рис. 2, б). Толщина его в течение всей зимы постоянно увеличивалась за счёт нарастания слоёв со стороны нижней кромки. Скорость нарастания льда неодинакова в течение зимы — в районе Хабаровска она уменьшается от 3,7 см в день в ноябре до 0,2 см в день в начале марта [13].

Вдоль правого берега протягивается полоса шириной 280 м сильно торосистого льда матового цвета, состоящего из смёрзшихся обломков

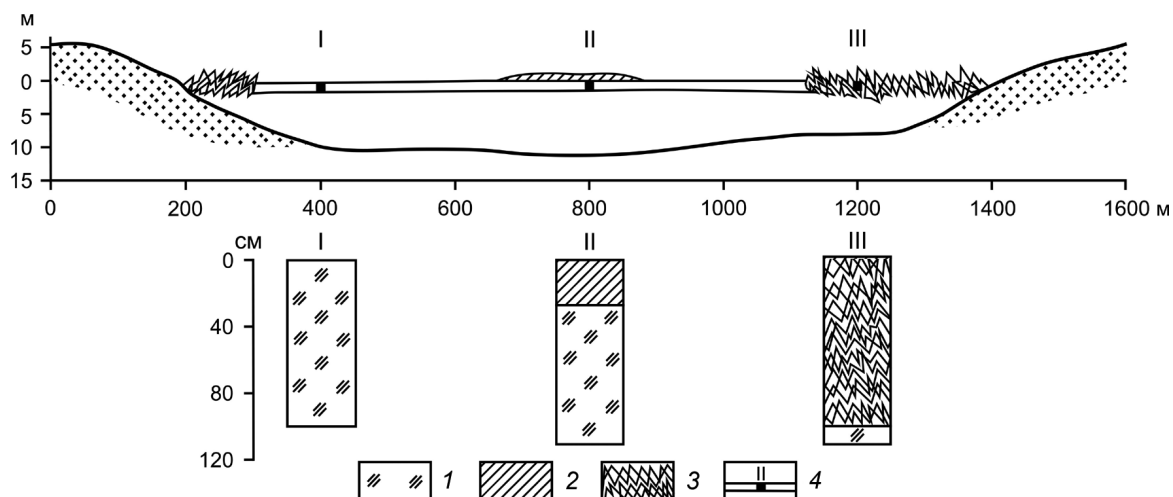


Рис. 1. Неоднородность строения льда в поперечном сечении р. Амур в районе г. Хабаровск (февраль 2020 г.). Разновидность льда: 1 – намёрзший; 2 – наледный; 3 – торосистый; 4 – места отбора проб льда и воды: I – левый берег; II – середина реки; III – правый берег

Fig. 1. The heterogeneity of the ice structure in the cross section of the Amur River near the city of Khabarovsk (February 2020)

1 – frozen ice; 2 – glacial ice; 3 – hummocky ice; 4 – sampling points for ice and water: I – the left bank; II – the middle of the river; III – the right bank

разных размеров, поверхности которых выделяются тёмными пятнами терригенно-биогенных включений. Она сформировалась в течение нескольких дней в начале зимы при достаточно высоких расходах воды и сразу после ледостава имела толщину 100 см. Торосы образуют хаотические нагромождения обломков льда высотой до 1,5 м (см. рис. 2, в). Общая толщина льда – 110 см, строение двухчленное – верхняя толща мощностью 100 см состоит из торосистого льда, нижняя мощностью 10 см – из прозрачного стекловидного, намёрзшего в конце зимы льда (см. рис. 2, з). Местами на ровной ледяной поверхности и торосистых участках посередине русла имеются протяжённые полосы наледного льда толщиной до 20 см, образовавшиеся в результате выдавливания воды по трещинам (см. рис. 2, д). Составная часть этого льда – снег, растаявший в момент поступления воды. Первичные неровности ледяной поверхности в результате образования наледного льда сглаживаются. Вся толща наледного льда имеет полупрозрачный матовый цвет с многочисленными рассеянными включениями главным образом терригенного материала (см. рис. 2, е).

Анализ содержания металлов в толще проводился для всех выделенных разновидностей льда. Учитывая особенности строения ледяной

толщи, исследовали следующие типы льда: у левого берега – намёрзший, посередине русла – наледно-намёрзший, вблизи правого берега – торосисто-намёрзший.

Результаты исследований

Распределение металлов в различных типах ледяной толщи зависит от стратиграфических особенностей толщи и условий формирования отдельных слоёв.

Намёрзший лёд стекловидного облика представлен всей толщей у левого берега (100 см). Распределение металлов сверху вниз по разрезу имеет следующие особенности (табл. 1). Для большинства металлов отмечается увеличение их содержания сверху вниз в верхней части толщи с максимальным содержанием в слое 40–60 см. В нижележащих слоях содержания Ni, Cu, Zn и Pb существенно уменьшаются за исключением Co и Cd. На глубине 40–60 см выделяется слой, по времени формирования соответствующий середине зимы, с повышенным содержанием всех металлов относительно их минимальных значений в других слоях этой толщи, особенно Fe (12,5 раз), Ni (8,9), Cr (8,0), Pb (5,5) и Zn (3,4). Отношение максимальных значений к минимальным для

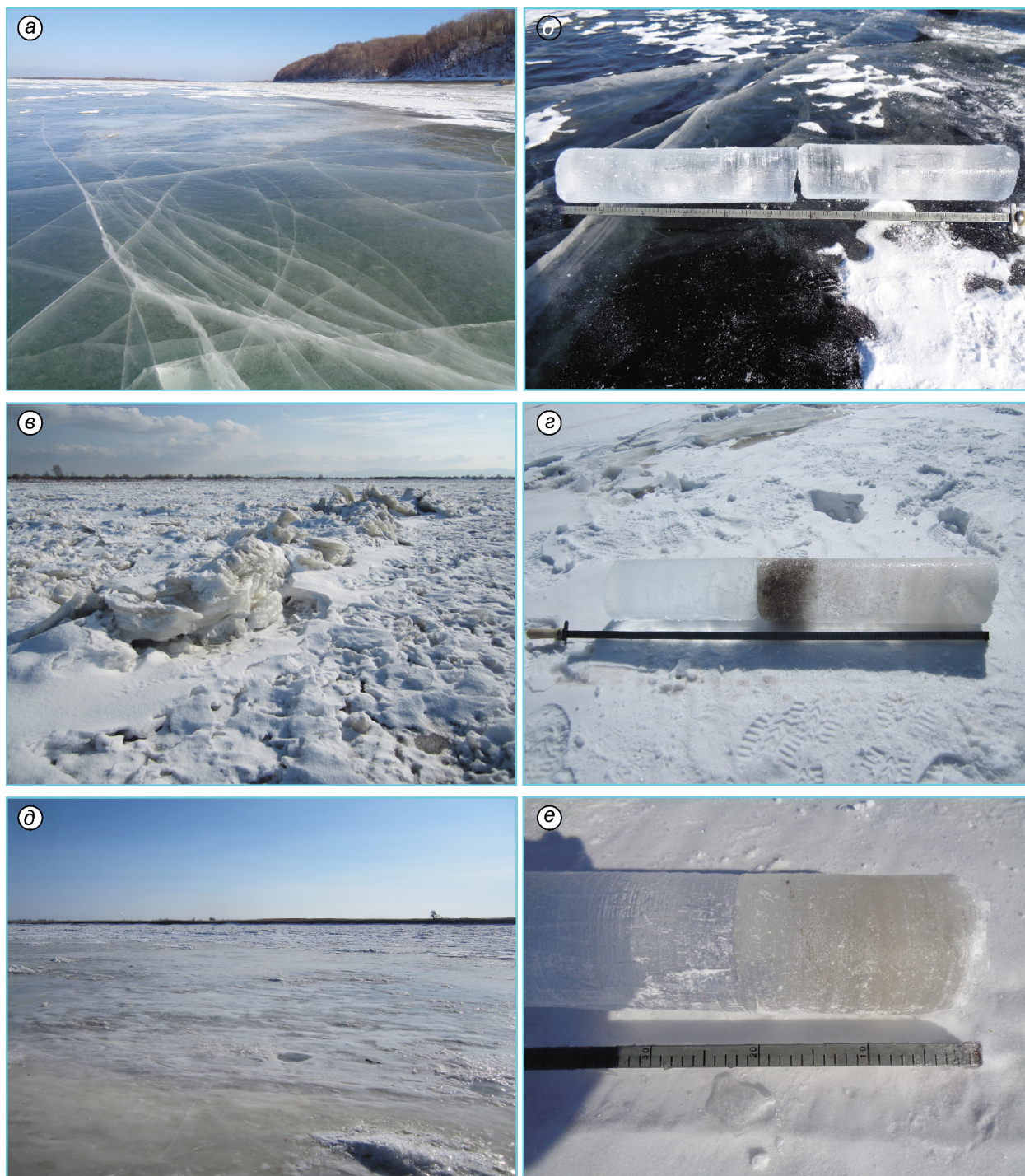


Рис. 2. Общий вид поверхности льда на различных участках р. Амур и полученные при бурении на них ледяные керны:

а, б – у левого берега; *в, г* – на середине реки; *д, е* – у правого берега

Fig. 2. General view of the ice surface in various sections of the Amur River and ice cores obtained during drilling on them: *а, б* – on the left bank; *в, г* – in the middle of the river; *д, е* – on the right bank

остальных слоёв льда находится в пределах 1,5–3,0 раза, лишь для Fe и Pb данное соотношение составляет 8,2 и 3,8 раза соответственно.

Наледно-намёрзший лёд распространён на середине русла и характеризуется двухчленным строением. Под слоем наледного матового льда толщи-

Таблица 1. Содержание металлов в различных разновидностях льда и подлёдной воде, мкг/дм³

Слой льда, см	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Fe	Mn
<i>Намёрзший лёд (левый берег р. Амур)</i>									
0–20	0,13	0,02	1,72	17,50	27,66	0,02	5,49	12,62	1,16
20–40	0,34	0,02	2,29	21,02	35,60	0,02	2,77	102,77	1,15
40–60	0,96	0,08	7,02	22,74	80,15	0,05	7,91	156,81	2,58
60–80	0,19	0,02	0,79	10,56	23,59	0,02	1,45	24,50	1,17
80–100	0,12	0,03	1,45	15,98	31,85	0,02	3,68	12,59	1,57
<i>Вода</i>	<i>0,41</i>	<i>0,14</i>	<i>1,14</i>	<i>3,22</i>	<i>18,52</i>	<i>0,04</i>	<i>0,17</i>	<i>580,14</i>	<i>43,36</i>
<i>Наледно-намёрзший лёд (середина р. Амур)</i>									
0–23	0,62	0,09	2,03	22,62	66,20	0,03	5,44	47,55	18,40
23–46	0,17	0,03	1,13	15,17	32,86	0,01	2,57	19,19	3,81
46–69	0,19	0,02	3,03	16,30	41,74	0,02	2,64	25,63	2,18
69–92	0,16	0,02	0,91	13,96	31,09	0,03	2,57	8,90	0,96
92–110	0,13	0,02	0,98	13,82	27,68	0,02	3,68	–	0,74
<i>Вода</i>	<i>0,63</i>	<i>0,15</i>	<i>1,24</i>	<i>4,79</i>	<i>12,46</i>	<i>0,01</i>	<i>0,21</i>	<i>497,23</i>	<i>27,17</i>
<i>Торосисто-намёрзший лёд (правый берег р. Амур)</i>									
0–28	0,30	0,07	2,91	15,76	40,54	0,03	5,07	18,90	10,71
28–56	0,43	0,04	3,05	23,78	47,76	0,04	3,79	27,38	5,93
56–76	0,17	0,05	2,46	13,54	34,66	0,03	3,18	34,77	11,53
76–100	0,29	0,06	2,78	21,43	53,37	0,02	9,31	127,96	21,07
100–110	0,23	0,05	5,44	38,69	68,20	0,04	8,16	19,69	3,37
<i>Вода</i>	<i>0,58</i>	<i>0,15</i>	<i>1,14</i>	<i>6,62</i>	<i>15,14</i>	<i>0,03</i>	<i>0,14</i>	<i>456,49</i>	<i>33,98</i>

ной 23 см залегает стекловидный прозрачный лёд (87 см), идентичный толще намёрзшего льда у левого берега реки. Распределение металлов в слоях намёрзшего льда в целом соответствует его распределению в аналогичной толще у левого берега (см. табл. 1). Здесь также в верхнем слое отмечаются повышенные содержания практически всех металлов по сравнению с самыми нижними слоями. На глубине 46–69 см чётко выделяется слой с наибольшим содержанием большинства металлов относительно их минимальных значений в нижележащих слоях: Fe – в 2,9, Ni – в 3,3, Cr – в 1,5, Zn – в 1,5 и Cu – в 1,2 раза. Наледный слой отличается от слоёв расположенного ниже намёрзшего стекловидного льда количественными характеристиками химического состава. Содержание металлов в нём заметно превышает аналогичный усреднённый показатель для всей нижележащей толщи намёрзшего льда. Наибольшее различие характерно для Cr (3,8), Mn (14,9) и Fe (2,7 раза). Для других тяжёлых металлов превышение составляет от 1,5 до 2 раз. Повышенные содержания металлов в наледном льду объясняются включением в него загрязнённого снега при его таянии в толще выступившей из-под льда воды.

Торосисто-намёрзший лёд, распространённый вдоль правого берега реки, также имеет двухчленное строение. Верхняя торосистая толща (100 см) состоит из отдельных обломков битого льда, принесённых из разных мест и смёрзшихся во время осеннего ледохода. Нижний слой толщиной 10 см состоит из намёрзшего в самом конце зимы льда. Для металлов в толще торосистого льда характерно неравномерное распределение их максимальных содержаний по слоям (см. табл. 1). Это связано с хаотическим нагромождением смёрзшихся обломков, перемешанных в водном потоке во время ледохода. Наибольшая концентрация Cr, Ni и Cu отмечается в верхних слоях, а Zn, Fe и Pb – в нижнем. При этом на глубине 56–76 см выделяется слой с минимальными значениями содержания металлов, что обусловлено наименьшим количеством загрязнённых обломков льда в этом слое. Отношение максимальных и минимальных значений в разных слоях этой толщи не столь велики, как в намёрзшем льду, и составляют для Pb – 2,9, Cr – 2,5, Cu – 1,8, Zn – 1,5, Fe – 6,8, Mn – 3,6 раза. В нижнем намёрзшем слое льда по сравнению с вышележащими торосистыми слоями отме-

чается повышенное содержание Ni, Cu и Zn в 2–3 раза, а несколько меньшее – Cr, Fe и Mn.

В нижнем течении Амура, кроме рассмотренных типов, встречаются и другие сочетания слоёв льда разного происхождения, образующие торосистый, торосисто-наледно-намёрзший, наледно-торосистый и другие типы ледовой толщи. На исследованном участке ниже Хабаровска в 2020 г. они не формировались, поэтому в дальнейшем будет интересно изучение распределения металлов в этих типах льда.

Обсуждение результатов

В результате анализа полученных данных установлено существенное различие в распределении металлов в толще льда не только на разных участках реки, но и в разновидностях льда различного происхождения, что показывают сравнения их средних показателей. Наименьшие средние содержания тяжёлых металлов отмечаются в намёрзшем льду (табл. 2). Несколько более высокие концентрации характерны для торосистого льда. При этом для разных металлов соотношение каждого из них в различных разновидностях льда неодинаково. Показатели для большинства металлов в намёрзшем и торосистом льдах довольно близки, с небольшим преобладанием в торосистом льду Cr, Cu, Zn, Pb и Fe. Более существенна разница отмечается для Ni (1,3) и Mn (7,2 раза).

Содержание металлов в наледном льду существенно выше, чем в намёрзшем и торосистом. Для Cr она в два раза больше, а для Cu, Zn и Mn – в 1,2–1,5 раза. Лишь содержание Ni меньше в наледном льду по сравнению с другими его разновидностями, что может быть связано с его небольшим аэрогенным поступлением. Повышенные содержания металлов в наледном льду объясняются включением в него загрязнённого снега при его таянии в толще выступившей из-под льда воды. Снежный покров на льду Амура распространён неравномерно, но на рассматриваемом участке во время исследований он составлял 10–12 см. К концу зимы снег был загрязнён в результате воздушного переноса тонкого терригенного материала и аэрозольных выбросов преимущественно энергетических предприятий Хабаровска.

Таблица 2. Средние содержания металлов в различных разновидностях льда, мкг/дм³

Разновидность льда	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn
Намёрзший	0,27	2,15	16,3	36,9	3,64	45,4	1,70
Торосистый	0,30	2,80	18,6	44,1	5,34	52,2	12,3
Наледный	0,62	2,03	22,6	66,2	5,44	47,8	18,40

Особенность намёрзших льдов – наличие слоёв с максимальным (40–60 см) и минимальным (60–100 см) содержанием всех химических компонентов. Широкий диапазон показателей отношений максимальных значений к их минимальным значениям (2,2–8,8) показывает различную интенсивность вовлечения металлов в лёд при разной скорости промерзания и температуре воды на границе лёд–вода. Слой 40–60 см с максимальными показателями концентраций элементов по времени формирования соответствует середине зимы, когда температура воздуха составляет от –25 до –30 °С в течение 20–25 дней, а мощность ледяного покрова ещё невелика. В этих условиях на нижней границе льда показатели границы температурной эвтектики могут несколько понижаться и при активном проявлении криогенных процессов химические элементы вовлекаются с разной скоростью. Повышение температуры воздуха во второй половине зимы до –18 °С и толщины льда до 60 см способствует увеличению температуры на границе фазы вода–лёд; температура эвтектики возрастает, и это приводит к снижению показателей концентраций элементов и формированию слоя 60–80 см с минимальным их содержанием.

Криогенные процессы активизируют не только фазовые переходы воды в лёд, но и вызывают сложные физико-химические преобразования в охлаждённой воде на границе со льдом [6]. По мере достижения подлёдной водой эвтектических точек начинается образование кристаллогидратов и избирательное вовлечение химических компонентов в лёд. В природной речной воде эвтектические точки, как правило, смещаются в ту или иную сторону, что нарушает соотношение скоростей сорбции ионов и образование кристаллогидратов на поверхности льда; в конечном счёте это приводит к различным показателям концентрации металлов в разных слоях льда по мере его нарастания.

Полученные данные позволяют установить распределение тяжёлых металлов по ширине

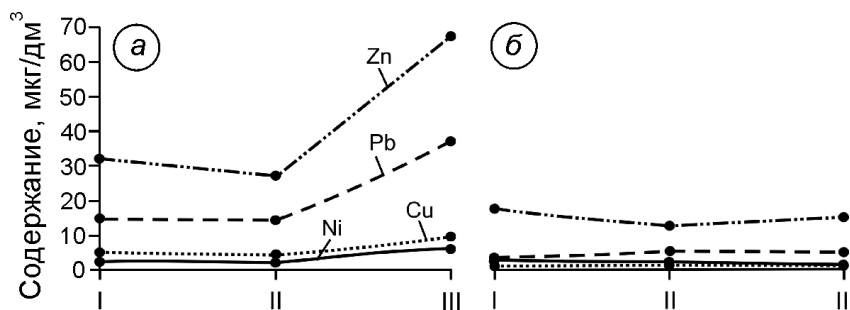


Рис. 3. Содержание некоторых тяжёлых металлов в нижнем слое намёрзшего льда (а) и в воде р. Амур под льдом (б):

I – у левого берега; II – на середине реки; III – у правого берега

Fig. 3. The content of metals in the lower layer of frozen ice (a) and the water of the Amur River (b):

I – on the left bank; II – in the middle of the river; III – on the right

Амура в подлёдной воде и толще льда, что имеет практический интерес. Анализ этих материалов важен для оценки влияния на загрязнение реки Хабаровска, расположенного на правом берегу Амура, выше по течению участка исследований. Загрязнение льда у левого берега реки с урбанизированной территории не установлено из-за слабого перемешивания водных масс в зимнее время на небольшом расстоянии от города. Для исключения влияния неоднородности льда при сравнении содержания в нём металлов использовались данные измерений в самом нижнем слое, поскольку он формировался в одинаковых условиях и в одно и то же время на разных участках русла.

Выявлена чётко выраженная зависимость содержания некоторых металлов в этом слое льда в поперечном сечении реки (рис. 3, а). Если у левого берега и на середине русла содержание металлов характеризуется близкими значениями, то у правого берега оно заметно увеличивается. Содержания Pb и Ni к этому берегу возрастают в 1,2–1,5 раза, а Cu и Zn – в 2,8 и 2,4 раза соответственно.

Увеличение содержания металлов во льду у правого берега, вероятно, обусловлено кумулятивным эффектом влияния города, когда при формировании слоя льда в течение нескольких десятков дней с минимальной скоростью наморзания, характерного для конца зимы, в нём происходит накопление металлов. В этом отношении лёд ведёт себя аналогично донным отложениям, которые в русле Амура ниже Хабаровска представляют собой надёжный критерий загрязнённости реки [14]. Сравнение содержаний различных металлов в нижнем слое намёрзшего льда и подлёдной воде показало их разное соотношение.

В намёрзшем льду содержание Co и Cu больше чем в воде в 5–7 раз, Pb – в 10–15 раз, Zn – в 1,2–2,0 раза. Для Cr отмечается обратное соотношение: его во льду в 2–4 раза меньше чем в воде, а Fe и Mn меньше соответственно в 46,1 и 37,4 раза. Ni и Cd не имеют чётко выраженных повышенных концентраций во льду или в воде.

В подлёдной воде содержание таких металлов, как Pb, Cu, Zn и Ni, слабо изменяется по ширине реки (см. рис. 3, б), что может быть связано с достаточно хорошим перемешиванием при небольшой ширине водного потока зимой, слабым влиянием притоков из-за их малой водности и незначительным поступлением стоков с городской территории в холодный сезон года. Вместе с тем в подлёдной воде отмечается превышение ПДК для рыбохозяйственных водоёмов по Cu (в 3,2–6,6 раза), Zn (1,2–1,9), Fe (4,6–5,8) и Mn (2,7–4,3). Для вод питьевого назначения ПДК превышены по Fe и в одной пробе – по Cu. Высокие значения ПДК могут быть связаны с хроническим загрязнением Амура этими металлами в результате развитой промышленности в бассейне Амура и высокого природного содержания Fe и Mn в водах реки в нижнем течении [10]. Таким образом, содержание металлов во льду более информативно для выявления загрязнений реки в зимнее время, чем в подлёдной воде.

Заключение

Впервые проведён анализ содержания тяжёлых металлов в различных разновидностях льда реки Амур, условия и продолжительность фор-

мирования которых существенно различаются. Это позволит совершенствовать геоэкологический анализ речного льда, применяемый для оценки загрязнения рек в зимний период. Для торосистого льда в целом характерно хаотическое распределение металлов по всей толще, что объясняется её быстрым формированием в период короткого времени – осеннего ледохода, продолжающегося в течение нескольких дней. Включение в смёрзшуюся толщу обломков льда, принесённых из расположенных выше участков речного русла, обусловило максимумы содержания разных металлов в различных слоях ледяного ядра торосистого льда. В толще нарастающего в течение всей зимы льда повышенное содержание тяжёлых металлов отмечается в верхних слоях, формировавшихся в начале зимы. В нижних слоях содержание их снижается из-за уменьшения поступления загрязняющих веществ в реку Амур к концу зимы. Вместе с тем внутри толщи имеются отдельные слои с повышенным содержанием металлов, что может быть связано с особенностями механизма их включения в лёд в разных температурных условиях нарастания льда.

Наиболее высокие концентрации металлов установлены в наледном льду, образующемся на поверхности ледяного покрова Амура. Наледи формируются в основном в конце зимы из-за выдавливания воды по трещинам. В их состав включаются аэрогенные загрязнения, накопленные на поверхности льда и в снежном покрове. Распределение металлов в ледяной толще, состоящей из слоёв различного по происхож-

дению льда, зависит от её стратиграфических особенностей. Оно характеризуется повышенным содержанием тяжёлых металлов в верхних слоях льда, представленных в русле Амура торосистым и наледным разновидностями льда. Без учёта выявленных особенностей строения льда возможна неправильная интерпретация полученных данных о загрязнении реки в зимний период. Влияние города Хабаровска в зимний период наиболее заметно по содержанию некоторых тяжёлых металлов в намерзающем льду реки Амур. Установлены повышенные содержания в нём Pb, Zn, Cu и Ni. Различия в содержании металлов в подлёдной воде в поперечном сечении Амура незначительны в зимний сезон и не отражают влияние промышленного загрязнения со стороны Хабаровска. Лёд в этом отношении – более информативный объект, и его химический состав может служить показателем экологического состояния реки в период ледостава.

Для установления экологического состояния рек перспективны гляциохимические исследования на основе сопряжённого анализа состава тяжёлых металлов в отдельных разновидностях льда и воды. Подобные работы будут интересны для оценки трансграничного загрязнения реки Амур.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-80022/20.

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) within the framework of the scientific project № 19-55-80022/20.

Литература

1. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
2. Шулькин В.М. Роль крупных коллоидов в химическом составе речных вод на примере рек юга Дальнего Востока РФ // Материалы XII совещания географов Сибири и Дальнего Востока, 28 сентября – 1 октября 2021 г. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2021. С. 105–108.
3. Чудаева В.А. Тяжелые металлы в р. Амур // Биогеохимические и экологические исследования природных и техногенных объектов экосистем Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1996. С. 147–183.

References

1. Chudaeva V.A. *Migratsiya khimicheskikh elementov v vodakh Dalnego Vostoka*. Migration of chemical elements in the waters of the Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2002: 392 p. [In Russian].
2. Shulkin V.M. The role of large colloids in the chemical composition of river waters on the example of rivers in the south of the Far East of the Russian Federation. *Materialy XII soveshchaniya geografov Sibiri i Dalnego Vostoka. 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2021 g.* Materials of the XII Meeting of geographers of Siberia and the Far East, September 28 – October 1, 2021. Vladivostok: TIG DVO RAN, 2021: 105–108. [In Russian].
3. Chudaeva V.A. Heavy metals in the Amur river. *Biogekhimicheskiye i ekologicheskiye issledovaniya prirodnikh i tekhnogennykh obyektov ekosistem Dalnego Vostoka*. Biogeochemical and ecological studies of natural

4. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I. Вып. 19. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 412 с.
5. Иванов А.В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов. М.: ВИНТИ, 1987. 236 с.
6. Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1988. 164 с.
7. Иванова В.И., Гончаров А.Ф. Микроэлементный состав снежного покрова, льда и воды Амура // Гляциохимические и криогенные гидрохимические процессы. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 106–108.
8. Иванов А.В. Формирование химического состава природных льдов Сибири и Дальнего Востока // МГИ. 1989. Вып. 67. С. 67–83.
9. Tao Wang, Xinlei Guo, Hui Fu, Yongxin Guo, Xuming Peng, Yunan Wu, Jiazhen Li and Yinyin Xia. Effects of Water Depth and Ice Thickness on Ice Cover Blasting for Ice Jam Flood Prevention: A Case Study on the Heilong River, China // Water. 2018. № 10. 700. doi: 10.3390/w10060700.
10. Кондратьева Л.М. Геоэкологические исследования речного льда // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 6. С. 511–520.
11. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Форина Ю.А., Ри Т.Д. Трансграничное загрязнение Амура в зимнюю межень 2005–2006 гг. // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 40–44.
12. Кондратьева Л.М., Бардюк В.В., Жуков А.Г. Аккумуляция и трансформация токсичных веществ во льдах рек Амур и Сунгари после техногенной аварии в Китае в 2005 г. // Лёд и Снег. 2011. № 2 (114). С. 105–116.
13. Махинов А.Н., Ким В.И., Матвеев Д.В. Структура и многолетняя динамика ледяного покрова в нижнем течении реки Амур // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 117–126. doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-117-126.
14. Махинов А.Н., Лю Шугуан, Махинова А.Ф., Чао-мин Даи. Влияние наводнений и урбанизации на содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях реки Амур // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 32–38. doi: 10.18412/1816-0395-2020-12-32-38.
- and technogenic objects of ecosystems of the Far East. Vladivostok: Dalnauka, 1996: 147–183. [In Russian].
4. *Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi*. Longterm data on the regime and resources of surface waters of the land. V. I. Is. 19. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986: 412 p. [In Russian].
5. *Ivanov A.V. Teoriya kriogennykh i glyatsiogennykh gidrokhimicheskikh protsessov*. Theory of cryogenic and glaciogenic hydrochemical processes. Moscow: VINITI, 1987: 236 p. [In Russian].
6. *Ivanov A.V. Kriogennaya metamorfizatsiya himicheskogo sostava prirodnykh ldov zamerezayuschih i talih vod*. Cryogenic metamorphization of the chemical composition of natural ice, freezing and meltwater. Khabarovsk: Dalnauka, 1988: 164 p. [In Russian].
7. *Ivanova V.I., Goncharov A.F. Trace element composition of snow cover, ice and water of the Amur. Glyatsiokhimicheskiye i kriogennyye gidrokhimicheskiye protsessy*. Glaciochemical and cryogenic hydrochemical processes. Vladivostok: FEB AN USSR, 1989: 106–108. [In Russian].
8. *Ivanov A.V. Formation of the chemical composition of natural ice in Siberia and the Far East. Materiali glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1989, 67: 67–83. [In Russian].
9. *Tao Wang, Xinlei Guo, Hui Fu, Yongxin Guo, Xuming Peng, Yunan Wu, Jiazhen Li and Yinyin Xia. Effects of Water Depth and Ice Thickness on Ice Cover Blasting for Ice Jam Flood Prevention: A Case Study on the Heilong River, China. Water*. 2018, 10: 700. doi:10.3390/w10060700.
10. *Kondratyeva L.M. Geoecological studies of river ice. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2010, 6: 511–520. [In Russian].
11. *Shesterkin V.P., Shesterkina N.M., Forina Yu.A., Ree T.D. Transboundary pollution of the Amur during the winter low-water period 2005-2006. Geografiya i prirodnyye resursy*. Geography and natural resources. 2007, 2: 40–44. [In Russian].
12. *Kondratyeva L.M., Bardyuk V.V., Zhukov A.G. Accumulation and transformation of toxic substances in the ice of the Amur and Sungari rivers after a technogenic accident in China in 2005. Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 2 (114): 105–116. [In Russian].
13. *Mahinov A.N., Kim V.I., Matveenko D.V. The structure and long-term dynamics of the ice cover in the lower reaches of the Amur River. Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 117–126. doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-117-126. [In Russian].
14. *Mahinov A.N., Lyu Shuguan, Mahinova A.F., Chaomin Dai* The impact of floods and urbanization on the content of heavy metals in the water and bottom sediments of the Amur River. *Ekologiya i promishlennost Rossii*. Ecology and industry of Russia. 2020, 24 (12): 32–38. doi: 10.18412/1816-0395-2020-12-32-38. [In Russian].