

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 546.49:551.341 (571.56)

# РТУТЬ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ

© 2024 г. В. Н. Макаров<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, 36, Якутск, 677010 Россия

\*E-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию 29.10.2023 г.

После доработки 19.02.2023 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Рассматриваются геохимические особенности миграции ртути в окружающей среде города, расположенного в криолитозоне. Среднее содержание Hg во взвешенных веществах приземной атмосферы колеблется от 0.11–0.22 зимой до 13–14 мг/т летом. Суммарный объем годового поступления Hg со взвешенными веществами из атмосферы на поверхность оценивается в 11 мкг/м<sup>2</sup>/год, 99% которого приходится на теплое время года. Анализ литохимических съемок на территории города показал, что среднее содержание Hg в городских почвах изменяется в пределах 6–22 мг/т. Наличие сезонноталого слоя, мерзлых и многолетнемерзлых пород определяет бинарное строение культурного слоя и контрастное распределение Hg в грунтах. Установлено, что возникновение аномальных концентраций Hg в грунтах культурного слоя определяется в основном поступлением загрязнителей в твердой и жидкой фазах и, в меньшей степени, поступлением из атмосферы и химическим составом аллювиального субстрата. Возникновение аномалий Hg в грунтах культурного слоя возрастом более 100 лет определяется преимущественно биофильным накоплением Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека. Максимальные содержания Hg до 2000–5000 мг/т, наблюдаются в сезонноталых грунтах в интервале глубин 1–4 м, с продолжительностью техногенного воздействия более 150 лет. В районах города с меньшим возрастом техногенного воздействия Hg также фиксируется в сезонноталых и мерзлых грунтах, при средней концентрации 50–120 мг/т, или образует слабоконтрастные аномалии только в почвенно-растительном слое.

**Ключевые слова:** атмосфера, взвешенные вещества, почвы, грунты, культурный слой, криолитозона, урбанизация, ртуть

DOI: 10.31857/S0869780924020042; EDN: DZQRIT

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных экологических задач является обеспечение экологической безопасности селитебных зон. Среди значительного спектра токсичных химических элементов наибольший интерес для оценки состояния компонентов окружающей среды и эколого-геохимической обстановки представляет ртуть. Ртуть и ее соединения — высоко токсичные вещества [3, 6, 10, 22, 25], относятся к веществам I-го класса гигиенической опасности для человека и биоты, что определяет особую важность проблемы изучения миграции и концентрации Hg в зонах урбанизации.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Геохимическая характеристика компонентов окружающей среды получена автором в результате многолетнего наблюдения за химическим

составом атмосферы, площадного литохимического мониторинга городских почв (1984–2021 гг.) и изучения керна буровых скважин. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения, от современных, возраст застройки которых менее 50 лет, до древних 300–350-летних. Их сопоставление позволяет судить о содержании Hg в грунтах культурного слоя в районах, различающихся возрастом городской застройки, а, следовательно, и техногенного воздействия.

Литохимические пробы (почвы, грунты) анализировались методом атомно-абсорбционной ртутотметрии (анализатор ртути РА-915) в Центральной геологической лаборатории ГУГГП «Якутскгеология». Содержание Hg в атмосферной пыли — масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методом в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института

проблем технологии микроэлектроники и особо-чистых материалов РАН.

Цель исследования — выявить особенности миграции и концентрации Hg в компонентах окружающей среды города, расположенного в криолитозоне, на примере г. Якутск. Изучение распределения Hg в специфических условиях урбанизированных территорий, где нет специализированных “ртутных” производств, обоснованы высокой экотоксичностью Hg даже в весьма низких концентрациях [6].

## ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Город Якутск протягивается вдоль левого берега р. Лена на 20 км, в широкой долине Туймаада. Якутск — крупнейший и старейший город, расположенный в пределах криолитозоны. Город интенсивно развивается, численность населения возросла с 195 тыс. человек в 2000 г. до 341 тыс. человек на 01.01.2022 г.

Планировочная структура города радиально-кольцевая. Характер застройки неравномерный: на окраинах города — преимущественно одно- и двухэтажные деревянные строения, в центральной части — капитальная застройка каменными зданиями (от 4 до 9–16 этажей), в новых микрорайонах — 9–16 этажей.

По классификации климата Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1.0 до 2.0), умеренно теплого (в летний период), с суровой малоснежной зимой [5]. Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьируется в пределах от  $-7.2$  до  $-12.1^{\circ}\text{C}$ , среднегодовое количество осадков — 235 мм.

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, выбрасывающих ежегодно 11700 т загрязняющих веществ [4]. Стационарные источники выбросов — преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции, предприятия стройиндустрии и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тыс. единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей.

Геологическое строение района определяется его положением в зоне стыка двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория находится на стыке Вилюйской лито-сидерофильной области с кларковым уровнем накопления V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоны с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au.

Аллювиальный комплекс  $aQ_{III}^{4}-Q_{IV}^{1}$  представлен в нижней части разреза галечниками и песками, а в верхней состоит из песков, супесей и суглинков, глин и торфа. В почвенном покрове на территории города доминируют урбаноземы и экраноземы различной мощности и характера образования. Как в породах аллювия, так и в почвах наблюдаются кларковое присутствие большинства редкоземельных элементов и незначительное накопление иттрия по сравнению с кларком земной коры.

Мощность многолетнемерзлых пород на территории города — 250–450 м, сезонного слоя (СТС) — 1.5–2.0 м.

Соотношение природных (климат, мерзлота, ландшафты, геология) и техногенных (городская инфраструктура, количество и состав загрязнителей) факторов определило формирование существующей эколого-геохимической ситуации в Якутске.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современные (голоценовые) аллювиальные отложения в долине р. Лена, представляющие собой почвообразующий субстрат, являются исходным поставщиком продуктов гипергенного выветривания и имеют исключительное значение для формирования современного элювия и почв. Комплекс аллювиальных отложений, представленный мелкозернистыми песками, переслаивающимися со средне- и крупнозернистыми, а также отдельными горизонтами супесей, линзами и прослоями суглинков, залегает на размытой поверхности юрских пород на глубине 19–25 м [18].

По химическому составу поровые воды аллювиальных отложений слабокислые, близкие к нейтральным ( $\text{pH} = 6.81$ ); слабоминерализованные (в среднем  $D_{\text{sal}} = 0.025\%$ ); сульфатно-гидрокарбонатные, смешанные по катионам; с относительно высоким содержанием аммония.

Много или мало Hg в аллювии р. Лена можно оценить, сравнив содержания этого элемента в аллювиальных отложениях с кларком земной коры (КЗК) [2]. Результаты сравнительного анализа показывают, что для аллювиальных песчано-глинистых и песчаных отложений в районе города характерна существенная разубоженность Hg на уровне 0.4 КЗК.

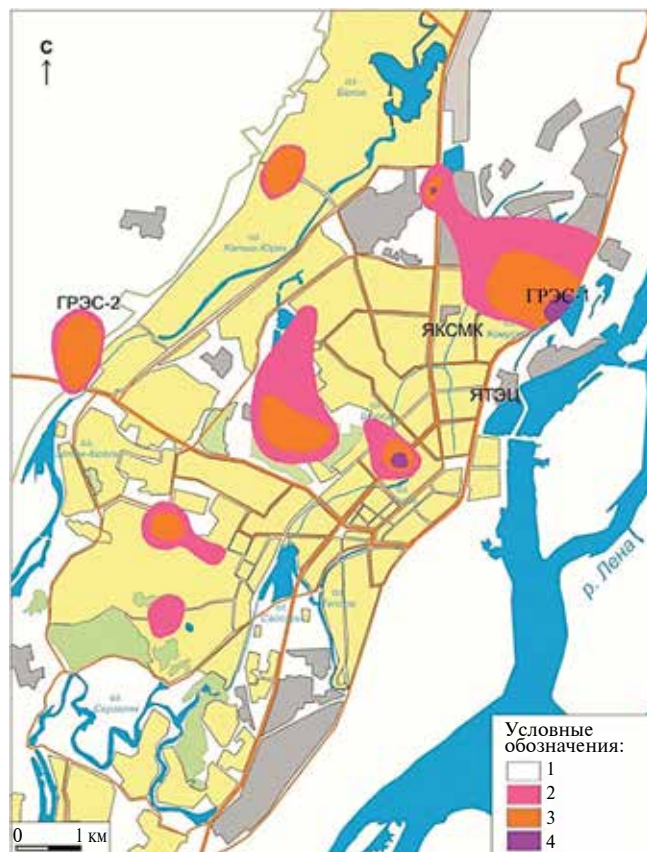
В геохимических циклах Hg большую роль играет ее атмосферный перенос. Многолетние наблюдения на арктических площадках показывают большую межгодовую изменчивость атмосферной ртути, что подразумевает сильную чувствительность Hg к факторам окружающей среды и, возможно, к изменению климата [24].

В атмосферном воздухе ртуть находится в газовой и пылеаэрозольной фазах, при этом

**Таблица 1.** Распределение Hg в атмосферных ВВ и объемы выпадения (Pn) из атмосферы Якутска [11]

| C <sub>мин</sub> | C <sub>макс</sub> | C <sub>ариф</sub> | C <sub>геом</sub> | Pn                      |                          |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| мг/т             |                   |                   |                   | мкг/м <sup>2</sup> /сут | мкг/м <sup>2</sup> сезон |
| Летние ВВ        |                   |                   |                   |                         |                          |
| 8                | 20                | 14                | 13                | 0.065                   | 11.0–16.9                |
| Зимние ВВ        |                   |                   |                   |                         |                          |
| 0.01             | 1.96              | 0.22              | 0.11              | $0.03 \times 10^{-3}$   | $5.7 \times 10^{-3}$ –44 |

Примечание. 80 проб.



**Рис. 1.** Содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове), мг/т. 1 – <0.2; 2 – 0.2–0.5; 3 – 0.5–1.0; 4 – 1.0–3.0.

в условиях техногенеза возрастает количество ртути в составе пылевой составляющей [9].

Среднее содержание Hg во взвешенных веществах (ВВ) приземной атмосферы Якутска колеблется от 0.11–0.22 (“зимняя пыль” – снег, твердая фаза) до 13–14 мг/т (“летняя пыль”). Объем выпадения Hg из атмосферы (Pn), рассчитанный с учетом средней концентрации ВВ в атмосфере [11], равен 5 г/м<sup>2</sup>/сут в теплое время года и 0.25 г/м<sup>2</sup>/сут зимой (табл. 1).

Суммарный объем годового поступления Hg с ВВ из атмосферы на поверхность оценивается

приблизительно в 11 мкг/м<sup>2</sup>/год, 99% которого приходится на теплое время года. Даже в пределах аномалий объем поступления Hg с ВВ из атмосферы не превышает 17 мкг/м<sup>2</sup>/год и не представляет существенной опасности загрязнения почвенного покрова.

Оценка содержания Hg в зимней газовой фазе, выполненная по снежному покрову, показала очень низкие содержания, менее 10 нг/л, в аэрозольной (зимней пыли) достигает 1–3 мг/т вблизи объектов энергетики и в центральной части города (рис. 1).

Уровень превышения содержания Hg в нерастворимой фазе снега над фоновыми значениями по отдельным объектам городской инфраструктуры (транспорт, энергетика, стройиндустрия) и в целом по территории города представлен в табл. 2. Максимальная аномальность, по отношению к фону (в 6.5–7.0 раз), наблюдается в районах электростанций ГРЭС-1 и ГРЭС-2, где содержание Hg в зимней пыли в 2.5 раза выше, чем в среднем по городу.

Можно полагать, что возникновение аномалий Hg вблизи объектов энергетики, сжигающих природный газ, связано с присутствием Hg в топливе. В газовом конденсате и природном газе большинства месторождений Hg присутствует естественным образом. Уровень содержания Hg в природном газе в целом не высок, но объемы добычи и использования газа таковы, что это может привести к значительным объемам выбросов Hg. В газовых месторождениях содержание Hg колеблется от менее 0.1 до 70 мкг/м<sup>3</sup>, а в конденсате – от менее 65 до 623 мкг/кг. Газ для потребителей содержит обычно очень низкий уровень Hg – около 0.05 мкг/м<sup>3</sup> ( $5 \times 10^{-8}$  г/м<sup>3</sup>).

Основные источники природного газа для жителей Якутска – Средневилюйское и Матахское газоконденсатные месторождения. Поскольку о Hg в углеводородных газах стало известно сравнительно недавно (около 50 лет назад), она не всегда включалась в число компонентов, обязательных для предварительного опробования газовых и газонефтяных месторождений. Сведений о содержании Hg в природном газе и конденсате

**Таблица 2.** Среднее содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове) в районе объектов городской инфраструктуры и показатель уровня аномальности

| Город                                    | Дороги | ЯТЭЦ | ГРЭС-1 | ГРЭС-2 | Домостроительный комбинат | Фон   |
|------------------------------------------|--------|------|--------|--------|---------------------------|-------|
| Среднее содержание Hg, мг/т              |        |      |        |        |                           |       |
| 0.22                                     | 0.40   | 0.07 | 0.55   | 0.59   | 0.098                     | 0.084 |
| Уровень аномальности по отношению к фону |        |      |        |        |                           |       |
| 2.6                                      | 4.8    | 0.8  | 6.5    | 7.0    | 1.2                       | 1     |

**Таблица 3.** Содержание Hg в почвах Якутска, мг/т

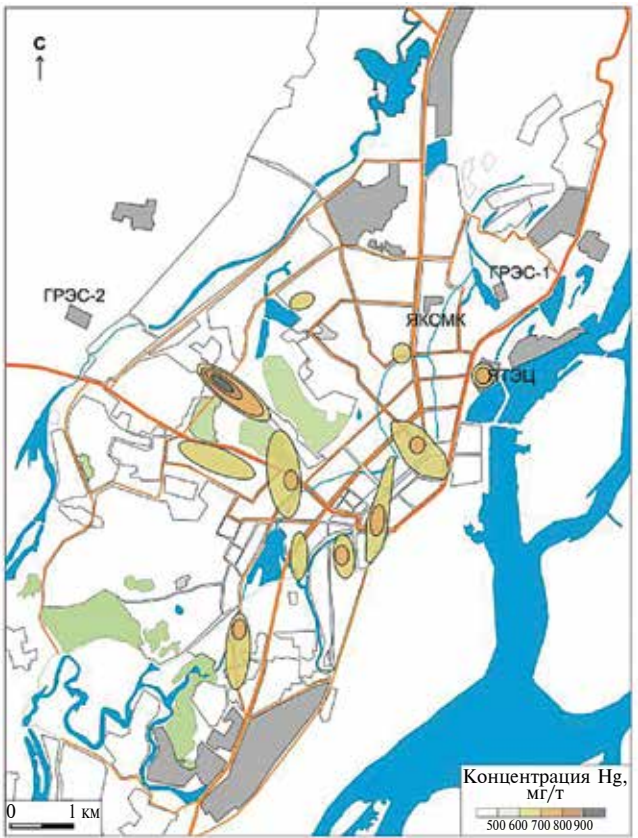
| Год             | 1984                   | 1993 | 1997 | 2011 | 2018 | Среднее |
|-----------------|------------------------|------|------|------|------|---------|
| С среднее       | 5.7                    | 22   | 8    | 19   | 9.5  | 12.8    |
| С максим        | 780                    | 270  | 210  | 739  | 282  | —       |
| Количество проб | 143                    | 175  | 173  | 184  | 162  | —       |
| ПДК, мг/кг      | Hg 2.1 (Pb+Hg: 20+1.0) |      |      |      |      | [3]     |

этих месторождений не найдено. Определение содержания Hg в природном газе, сжигаемом в одной из котельных города, было выполнено в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (1991 г.) по методу, разработанному и применяемому для анализа воздуха [15]. По данным анализов, среднее содержание Hg в природном газе составило  $3.4 \times 10^{-8}$  г/м<sup>3</sup>, при диапазоне определений  $(1.3\text{--}5.4) \times 10^{-8}$  г/м<sup>3</sup>. Это примерно на два порядка выше фоновых значений для приземной атмосферы Земли [9] и соответствует средней концентрации Hg в углеводородных газах газовых и нефтегазовых месторождений России [22].

Анализ длинного ряда (1984–2018 гг.) литохимических съемок на территории города показал, что среднегодовое содержание Hg в городских почвах изменяется в пределах 6–22 мг/т, а максимальное достигает 2210 мг/т (табл. 3).

Почва, загрязненная Hg, представляет опасность, так как является источником поступления в организм человека с продуктами питания и вторичного загрязнения приземного слоя воздуха [1]. К умеренно опасной категории загрязнения почв Hg можно отнести локальные участки, расположенные преимущественно в центральной части города, где содержание Hg в почвах включает естественные концентрации Hg и вклад, связанный с распространением от конкретных местных источников при локальном переносе загрязнений. Опасной, превышающей ПДК [3], является только постоянно отмечаемая в период наблюдений аномалия Hg на старой городской свалке (Вилуйский пер.), где большие площади занимает бытовой мусор (рис. 2).

В пределах контрастных атмохимических аномалий Hg, возникающих в районах объектов энергетики, где она поступает в атмосферу в основном



**Рис. 2.** Аномалии Hg в почвах Якутска (2018 г.).

в парогазовой форме, литохимические аномалии в почвах не образуются.

Концентрации Hg в атмосферной пыли и почвах практически идентичны. Наблюдается очень слабая зависимость возрастания содержания Hg от увеличения запыленности атмосферы (рис. 3).

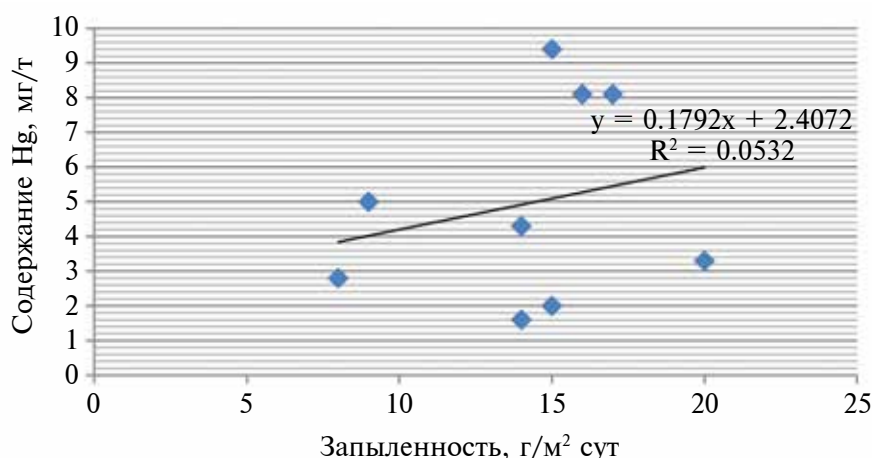


Рис. 3. Зависимость содержания Hg во взвешенных веществах приземной атмосферы от запыленности воздуха.

Объем поступления Hg с ВВ из атмосферы на поверхность почвы равен в среднем  $0.055 \text{ мкг/м}^2/\text{сут}$  и не представляет опасности загрязнения почвенного покрова. Об этом свидетельствует и несовпадение контуров атмо- и литохимических аномалий Hg на территории города (см. рис. 1 и 2).

Геологическая деятельность человека привела к возникновению нового вида пород — техногенных отложений — культурного слоя (КС). Сведения о накоплении микроэлементов, главным образом тяжелых металлов и Hg в КС посвящен ряд работ по крупным городам [14, 16, 19, 23]. Между тем, практически отсутствуют данные о геохимических особенностях распределения Hg в КС городов, расположенных в криолитозоне.

Техногенное поступление Hg в городские почвы и грунты КС практически не связано с выпадением из атмосферы и обогащением при преобразовании аллювиальных отложений, так как содержание в атмосфере невысоко, а в аллювиальных отложениях, на которых сформировался почвенный покров, значительно ниже кларкового. Об этом свидетельствует и отрицательное значение коэффициента аэрозольной концентрации [12], указывающее на отсутствие обогащения твердой фазы аэрозоля за счет состава исходного литогенного материала. Концентрация Hg в талых и мерзлых грунтах КС значительно выше, чем в городских почвах.

Впервые характеристика КС в криолитозоне была дана Н.И. Салтыковым в статье “О фундаментах зданий г. Якутска”. Мощность этого слоя, состоящего “...из перегноя, строительного мусора и отходов, накопившихся в течение трехсотлетнего существования города и перемешавшихся с естественным пылевато-суглинистым покровом, ... меняется в связи с возрастом отдельных участков города. Наибольшей величины (до 1.50–1.75 м) она достигает в районе ... заселенном уже в конце XVII в.” [17, с. 102]. Интересно, что “... в “культурном”

слое, обильном перегноем, надмерзлотные воды города содержат в значительном количестве примеси солей  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4$  и других, которые иногда остаются в жидком состоянии до температуры минус  $3^\circ\text{--}4^\circ\text{C}$ ” [там же, с. 103].

Техногенные отложения на территории г. Якутск многокомпонентны. Это природные аллювиальные образования, перемещенные при городском строительстве, и отбросы различного происхождения: производственные и строительные отходы, обычный бытовой мусор и т.п. Характерными для КС центральных улиц города являются захороненные остатки торцовой мостовой из деревянных листовенных чурбаков, установленных на слой привозного песка, толщиной около 0.5 м.

Условия формирования КС на территории Якутска весьма специфичны, его верхняя часть — это арена ежегодного проявления процессов сезонного промерзания и оттаивания грунтов и существования надмерзлотных вод. Неотъемлемой частью строения техногенных отложений, преимущественно в старой части города, являются подземные льды (лед-цемент, ледяные прослои, линзы, жилы).

Наличие многолетнемерзлых пород определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами и особенно — миграцией химических элементов.

Мощность КС в Якутске изменяется от центра города к окраинам. Средняя мощность отложений в старых районах города около 4 м, а в “молодых” на окраинах — менее 2.5 м.

В результате более чем трехвекового освоения городской территории в Якутске сформировалась локальная биотехносфера. Формирование литологических и геохимических параметров КС в городе происходило в два исторических этапа.

Первый — “деревенский”, возрастом более 300 лет, с начала застройки территории (1642 г.) и до середины 1950-х гг. В этот период формирование КС обуславливалось содержанием большого числа лошадей и коров, печным отоплением, отсутствием канализации, что отразилось на накоплении органического вещества. В условиях криолитозоны в анаэробной среде органическое вещество в КС очень хорошо сохраняется (выгребные ямы, навоз). Специфический гнилостный запах чувствуется при оттаивании мерзлых грунтов КС обычно на глубине 2–4 м, иногда до 6–8 м. Характерно существенное накопление в мерзлых грунтах КС нитратов (0.027–0.071 мг-экв), указывающее на присутствие “старой” органики, в то время как в сезонноталых грунтах КС содержание  $\text{NO}_3^-$  на порядок меньше и составляет всего 0.003 мг-экв.

Второй этап — “городской”, охватывает последние 70–80 лет, когда изменился характер хозяйственной жизни города, и сформировалась собственно урбанизированная территория: высотная застройка, канализация, транспорт, энергетика, промышленность.

Геохимическая характеристика отложений КС получена автором в результате многолетнего площадного литохимического мониторинга городских почв и изучения керна буровых скважин. Районы Якутска различаются возрастом городской застройки, а, следовательно, и продолжительностью техногенного воздействия. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения. Их сопоставление позволяет судить о химическом составе и содержании Hg в КС в каждом участке урбанизации. (рис. 4).

В “деревенский” и “городской” этапы формирования КС характер источников поступления Hg в грунты различался, но основными были хозяйственная деятельность жителей города и непосредственное внесение загрязнителей в почво-грунты в твердой и жидкой фазах.

В “деревенский” период Якутск представлял собой большую деревню. “Значительная часть жителей г. Якутска содержала конный и рогатый скот. Чуть ли не в каждом дворе заметите хлева для рогатого скота, загоны и конюшни для лошадей, огороды и т.д.” [13, с. 102]. “В XIX столетии ... крупными владельцами домашнего скота были купцы ...: у Феофана Соловьёва содержалось 150 лошадей, 10 быков и 20 коров, у Федота Соловьёва — 100 лошадей, у Захарова Андрея было 70 лошадей, 30 кобылиц, 15 быков, 85 коров. ... В г. Якутск на убой пригонялось скота ежегодно до 3 тыс. голов” [там же, стр. 105]. В этот период основным источником поступления Hg в литогенную среду было биологическое накопление Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека. По возрастающей степени аккумуляирования ртути млекопитающие

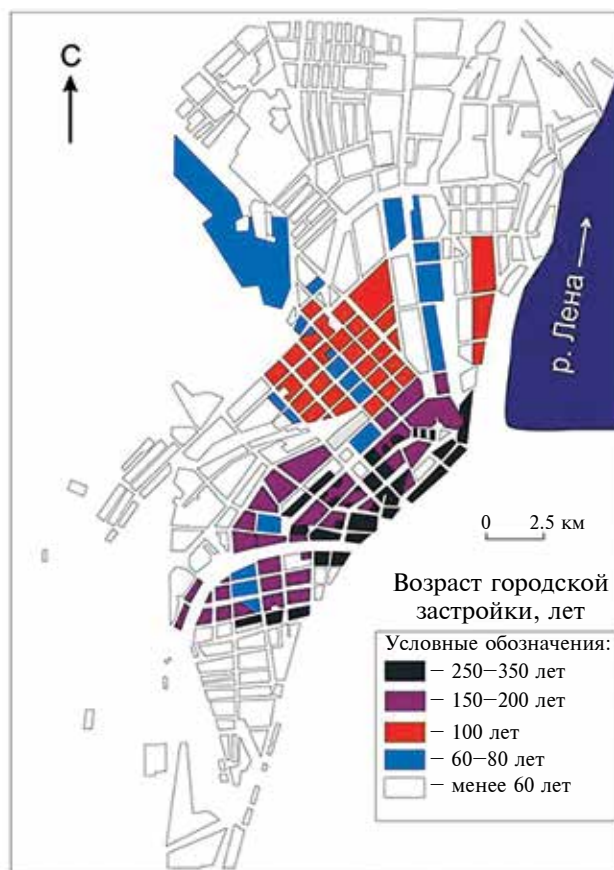


Рис. 4. Возраст городской застройки Якутска (составлен по планам и картам города с XVIII в. и по настоящее время).

Таблица 4. Содержание Hg в экскрементах животных и птиц, мг/т [8]

| Объект исследования | На участках аномалий | На контрольных участках |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
| Бараний навоз       | 936                  | 20                      |
| Конский навоз       | 3137                 | 70                      |
| Коровий навоз       | 2720                 | 70                      |
| Куриный помёт       | 3790                 | 110                     |

приоритетны в ряду организмов: растения < насекомые < почвенные микроорганизмы < травоядные млекопитающие < хищные млекопитающие < макромицеты [6].

По данным Я.В. Зачиняева [8], среднее содержание Hg в экскрементах сельскохозяйственных животных колеблется от 20 до 110 мг/т, а на участках аномалий достигает 2000–3000 мг/т (табл. 4).

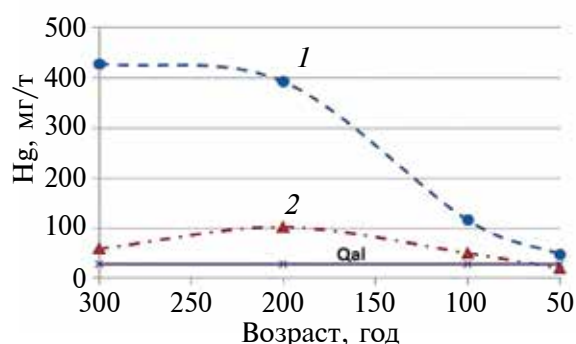
Среднее содержание Hg в грунтах КС “деревенского” периода, возраст которых более 100 лет, колеблется в пределах 50–100 мг/т, что вполне

**Таблица 5.** Поступление Hg в окружающую среду Якутска за счет бытовых термометров

| Год                                    | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Население, тыс. чел.                   | 108  | 157  | 192  | 195  | 270  | 323  |
| Поступление Hg за счет термометров, кг | 13.4 | 19.5 | 23.8 | 24.2 | 33.5 | 40.0 |

**Таблица 6.** Среднее содержание Hg в компонентах зоны гипергенеза Якутска, мг/т

| Компоненты зоны гипергенеза |       |                                 |                           |                 |
|-----------------------------|-------|---------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Атмосфера,<br>ВВ (лето)     | Почвы | Грунты КС                       |                           | Q <sub>al</sub> |
|                             |       | сезонноталые, КС <sub>СТС</sub> | мерзлые, КС <sub>МП</sub> |                 |
| 13                          | 12.8  | 140                             | 42                        | 28              |



**Рис. 5.** Зависимость концентрации ртути в сезонноталых (1) и мерзлых (2) грунтах КС от продолжительности техногенного воздействия.

сопоставимо с данными Я.В. Зачиняева [8] о биофильном накоплении Hg.

В “городской” этап формирования КС поступление Hg в грунты определялось воздействием урбанизации, в первую очередь сжиганием органического топлива: природного газа, а также угля, дров, накоплением ртутьсодержащих ламп, различных приборов, обычных градусников, ртутных термометров для измерения температуры тела. Широкое использование ртутных термометров в быту, медицине, сельском хозяйстве, промышленности и в других сферах человеческой деятельности является одним из существенных источников поступления ртути в среду обитания.

По расчетам Е.П. Янина [20], ежегодно из строя выходит 1 ртутный термометр на 16 жителей. Отсюда следует, что в последние годы ежегодно в Якутске используются (выходят из строя, разбиваются и т.д.) порядка 20 тыс. ртутных термометров, в которых содержится около 40 кг Hg. Из этого количества примерно 3–4 кг в той или иной мере утилизируются на специальных предприятиях, а остальная Hg, около 37 кг, поступает, главным образом на свалки отходов и в канализацию, в конечном счете рассеиваясь в окружающей

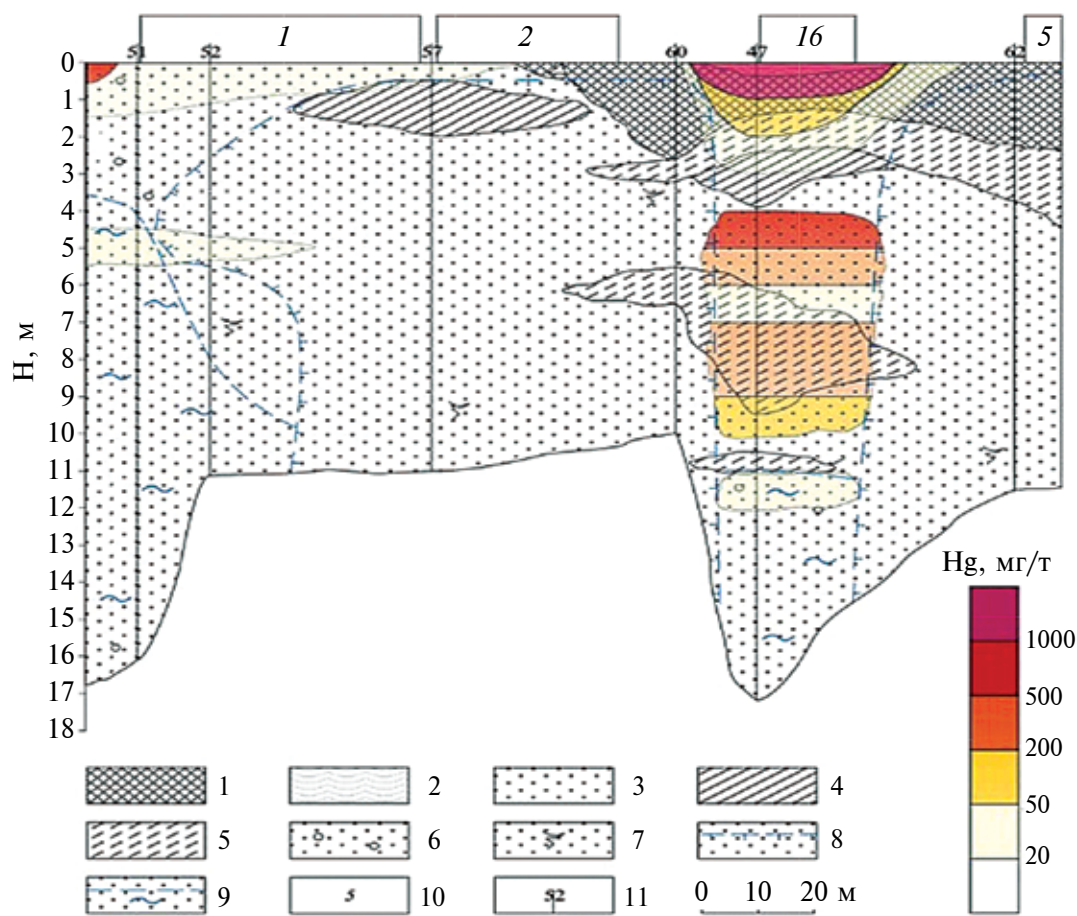
среде. По нашей оценке, за последние 50 лет количество техногенной Hg, попадающей в городскую окружающую среду только за счет бытовых термометров, составляло от 13 до 40 кг (табл. 5).

По данным [22], загрязнение окружающей среды бытовыми термометрами составляет 2/3 всего количества Hg, поступающей с бытовыми отходами. Ориентировочно можно считать, что в почвы и поверхностные воды города в последние годы ежегодно привносится около 50 кг этого токсичного металла.

Мерзлые (КС<sub>МП</sub>) и сезонноталые (КС<sub>СТС</sub>) грунты культурного слоя близки по химическому составу к поровым растворам — это слабощелочные, смешанные по составу катионов и анионов растворы с незначительным преобладанием гидрокарбонатов и натрия. Верхние горизонты культурного слоя (КС<sub>СТС</sub>) отличаются большей соленостью (D<sub>sal</sub> = 0.096%). В нижнем горизонте (КС<sub>МП</sub>) величина солености понижается до D<sub>sal</sub> = 0.078%.

Техногенные геохимические аномалии в сезонноталых и мерзлых грунтах КС Якутска различаются по уровню концентрации Hg. Верхние горизонты КС<sub>СТС</sub> отличаются максимальным среди компонентов зоны гипергенеза содержанием Hg, в среднем 140 мг/т. В нижележащих КС<sub>МП</sub> среднее содержание Hg понижается до 42 мг/т (табл. 6).

Дефицит Hg на поверхности (в почвах), по сравнению с грунтами КС связан с процессами криогенного перераспределения загрязняющих веществ, когда в зимний период происходит миграция в более глубокие горизонты сезонноталого слоя. Понижение концентрации макро- и микрокомпонентов в почвах за зимнее время за счет этих процессов, а, следовательно, и глубинный перенос подвижных форм компонентов, могут составить для HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cu и Hg 60–80%, Cl<sup>-</sup>, Sn и Na<sup>+</sup> — 20–40% [10]. Контрастность аномалий Hg в грунтах КС по сравнению с содержанием в аллювиальных отложениях составляет в КС<sub>СТС</sub> — 5, а в КС<sub>МП</sub> — 1.5. Содержание Hg в КС<sub>МП</sub> в 3 раз



**Рис. 6.** Литохимические аномалии Hg в грунтах талика, мг/т. 1 – грунт насыпной; 2 – почвенно-растительный слой; 3 – песок; 4 – суглинок; 5 – супесь; 6 – песок с галькой; 7 – песок с органикой; 8 – граница мерзлых пород; 9 – водоносный горизонт; 10 – здания и сооружения ЯТЭЦ; 11 – главный корпус, 12 – здание водогрейных котлов, 13 – углекислотный цех, 14 – химводоочистка; 15 – номер буровой скважины.

меньше, чем в  $KC_{CTC}$  (см. табл. 5), что может быть связано не только с различной интенсивностью техногенеза, но и со снижением миграционной способности Hg при постоянно отрицательной температуре мерзлых грунтов.

Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий ( $KK \geq 5$ ) в грунтах КС по сравнению с аллювиальными отложениями свойственна хлоридам, соединениям азота и Hg (в скобках коэффициент контрастности):  $Cl^-$  (29),  $NO_3^-$  (18),  $K^+$  (16),  $Na^+$  (14),  $NO_2^-$  (12),  $SO_4^{2-}$  и Hg (5). Этот ряд отражает специфику техногенного воздействия, которая определяется засолением и внесением органики в почвы и грунты КС.

Техногенное, преимущественно хлоридное, засоление и контрастные аномалии Hg и макро- и микроэлементов в старых районах города охватывают полностью породы КС ( $KC_{CTC}$  и  $KC_{МП}$ ) и иногда проникают встилающие их верхние горизонты аллювиальных отложений.

Наблюдается зависимость мощности техногенных геохимических ореолов Hg в грунтах

КС от возраста освоения городской территории. В старых районах города, где продолжительность техногенного воздействия превышает 200 лет, мощность геохимических аномалий Hg достигает 8–10 м, в более молодых, 100-летних – до 3–5 м, в районах современной застройки не превышает 0.5–1 м.

С продолжительностью техногенного воздействия связано и возрастание концентрации Hg в грунтах КС (рис. 5). Наиболее ярко проявляется эта зависимость в сезоннотальных слоях  $KC_{CTC}$ , наиболее доступных загрязнению. В самых старых 200–350-летних грунтах  $KC_{CTC}$  средняя концентрация Hg около 400 мг/т, в 3–7 раза выше, чем в более молодых столетних, а максимальные значения достигают 2000–5000 мг/т (до 2.5 ПДК).

Ураганные концентрации и формирование контрастных аномалий Hg наблюдаются и в грунтах современных техногенных таликов, где накопление Hg не связано с многолетним загрязнением. Подобная аномалия Hg сформировалась в песках и супеях техногенного несквозного талика на территории Якутской тепловой

электростанции (ЯТЭЦ). Главной причиной изменения теплового состояния грунтов и образования водоносных таликов глубиной на локальных участках до 25 м являются аварийные утечки воды из водонесущих коммуникаций. При этом температура грунтов увеличивается на десятки градусов с образованием техногенного талика. На большей части территории ЯТЭЦ грунты находятся в многолетнемерзлом состоянии, а участки локальных таликов занимают не более 20%. Мощность слоя сезонного промерзания в зависимости от степени растепления грунтов изменяется от 2 до 4 м, а глубина сезонного протаивания – от 1.5 до 4.5 м [7].

Формирование ртутной аномалии на территории ЯТЭЦ обусловлено сбросами высококонцентрированных промышленных вод кожевенного завода (1930–1960 гг.) по галерее, проложенной по территории электростанции, а также загрязнением при использовании на электростанции угля в 1936–1967 гг. Распределение Hg в мерзлых грунтах в основании электростанции равномерно по разрезу и не превышает 20 мг/т. Аномалия Hg сформировалась только в талых грунтах до глубины 12 м, и концентрация Hg постепенно снижается: на глубине 1 м – 3170, 4–5 м – 500–100, 12 м – 20–50 мг/т (рис. 6).

Санация экологически опасных ртутных аномалий на территории города может быть выполнена методами экскавации загрязненных почвогрунтов с их последующей переработкой или физическим с последовательным разделением: сепарация, отмучивание, обогащение [21]. Если санация ртутной аномалии на территории старой свалки мусора не представляет значительных усилий, то обнаружение и ликвидация экологически значимых объемов Hg в сезонноталых грунтах КС представляет собой трудную задачу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование КС в г. Якутске происходило в два исторических этапа: “деревенского” – на протяжении более 300 лет, со дня начала застройки территории (1642 г.) и до середины 1950-х гг., и “городского”, когда в последние 70–80 лет сформировалась собственно урбанизированная территория. Исторические, техногенные и геокриологические условия формирования КС в Якутске определили особенности химического и минерального состава, литологического строения, физико-механических свойств толщи и миграции Hg в сезонноталых и мерзлых техногенных отложениях.

Концентрирование Hg в грунтах КС города мало связано с геохимическими свойствами аллювиальных четвертичных отложений и поступлением металла из атмосферы при сжигании природного газа и пылевом загрязнении. Основной

источник загрязнения грунтов КС – ртутьсодержащие отходы хозяйственной деятельности городских жителей.

Возникновение аномалий Hg в грунтах КС возрастом более 100 лет определяется преимущественно биофильным накоплением Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека.

Контрастные аномалии Hg в старых районах города охватывают полностью сезонноталые и мерзлые грунты КС (до 5–6 м), иногда проникая глубже, в кровлю аллювиальных отложений.

Максимальные содержания Hg наблюдаются в сезонноталых грунтах КС в интервале глубин 1–4 м, с продолжительностью техногенного воздействия более 150 лет. В районах города с меньшим возрастом техногенного воздействия Hg также фиксируется в сезонноталых и мерзлых грунтах КС (до глубины 2–4 м), при средней концентрации 50–120 мг/т, или образует слабоконтрастные аномалии только в почвенно-растительном слое.

В современных условиях ураганные концентрации Hg могут формироваться в техногенных таликах, на участках аномального растепления мерзлых отложений, достаточно быстро – за 1–2 года.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / [М.И. Герасимова и др.]. М.: Изд-во: Ойкумена, 2003. 270 с.
2. *Виноградов А.П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Стандартинформ, 2006. 15 с.
4. Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г. <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2021).
5. *Григорьев А.А., Будыко М.И.* Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1959. № 3. С. 3–19.
6. *Ермаков В.В.* Биогенная миграция и детоксикация ртути // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. симп. (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 8–22.
7. *Заболотник С.И., Заболотник П.С.* Динамика температуры грунтов вокруг и под зданием Якутской тепловой электростанции // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 70–80.
8. *Зачиняев Я.В.* Ртуть и экологическая безопасность лошадей // NovaInfo, 2011. № 4. <https://novainfo.ru/article/527>.
9. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Справочник в 6 кн.: Кн. 5: Редкие d-элементы / Под ред. Э.К. Буренкова. М.: Экология, 1997. 576 с.
10. *Макаров В.Н.* Геохимические поля в криолитозоне. Якутск: Изд-во ИМ СО РАН, 1998. 116 с.
11. *Макаров В.Н., Торговкин В.Н.* Геохимия техногенных отложений (культурного слоя) в криолитозоне (на примере г. Якутска) // Криосфера Земли. 2018. № 3. С. 27–39.

12. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский. М.: Изд. центр "Академия", 2003. 400 с.
13. Попов Г.А. История города Якутска. 1632–1917 гг.: Краткие очерки. Т. III. Якутск: Изд-во Якутский гос. ун-т. 2007. 305 с.
14. Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд За экономическую грамотность, 1997. 310 с.
15. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 449 с.
16. Садовникова Л.К. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами // Биологические науки. 1989. № 9. С. 47–52.
17. Салтыков Н.И. О фундаментах зданий г. Якутска // Тр. Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева. Т. 1. Жилищное и мелкопромышленное строительство в районах распространения вечной мерзлоты. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 102–136.
18. Снектор В.В., Бакулина Н.Т., Снектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на "Якутском разбеге" // Геоморфология. 2008. № 1. С. 87–94. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-87-94>
19. Экология города / Отв. ред. Н.С. Касимов. М.: Научный мир, 2004. 624 с.
20. Янин Е.П. Экологические аспекты производства, использования и утилизации ртутных термометров в России // Экологическая экспертиза. 2004. № 6. С. 2–36.
21. Янин Е.П. Технологии очистки ртутьсодержащих почв и грунтов (зарубежный опыт) // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. Междунар. симп. (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 469–471.
22. ACAP. Assessment of Mercury Releases from the Russian Federation. Prepared for the Arctic Council by the Russian Federal service for Environmental, Technological and Atomic Supervision and the Danish Environmental Protection Agency, 2005. 344 с.
23. Clarkson T.W. Mercury: Major Issues in Environmental Health // Environmental Health Perspectives. 1993. V. 100. P. 31–38.
24. Fisher J.A., Jacob D.J., Soerensen A.L. et al. Factors driving mercury variability in the 14 Arctic atmosphere and ocean over the past 30 years // Global Biogeochem. Cycles. 2013. V. 27. P. 1226–1235.
25. Tchounwou P.B. et al. Review: environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public // Environmental Toxicology. 2003. V. 18. № 1. P. 149–175.

## MERCURY IN THE URBAN AREA ENVIRONMENT IN THE CRYOLITHOZONE

V. N. Makarov<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences  
ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

<sup>\*</sup>E-mail: [vnmakarov@mpi.ysn.ru](mailto:vnmakarov@mpi.ysn.ru)

The geochemical features of mercury migration in the environment of a city located in the permafrost zone are considered. The average Hg content in suspended matter in the surface atmosphere ranges from 0.11–0.22 in winter to 13–14 mg/t in summer. The total annual intake of Hg from explosives from the atmosphere to the surface is estimated at 11 µg/m<sup>2</sup>/year, 99% of which occurs in the warm season. Analysis of lithochemical surveys in the city showed that the average Hg content in urban soils varies within the range of 6–22 mg/t. The presence of a seasonally thawed layer, frozen and permafrost rocks determines the binary structure of the cultural layer and the contrasting distribution of Hg in soils. It has been established that the abnormal Hg concentrations in the soils of cultural layer are mainly due to the intake of pollutants in the solid and liquid phases and, to a lesser extent, by the intake from the atmosphere and the chemical composition of the alluvial substrate. The occurrence of Hg anomalies in soils of a cultural layer older than 100 years is determined primarily by the biophilic accumulation of Hg in organic objects of vital activity of domestic animals and humans. Maximum Hg contents of up to 2000–5000 mg/t are observed in seasonally thawed soils in the depth range of 1–4 m, with a technogenic impact lasting more than 150 years. In the urban areas with less lasting technogenic impact, Hg is also fixed in seasonally thawed and frozen soils, with an average concentration of 50–120 mg/t, or forms low-contrast anomalies only in the soil-vegetation layer.

**Keywords:** atmosphere, suspended substances, soils, soils, cultural layer, permafrost zone, urbanization, mercury

### REFERENCES

1. [Anthropogenic soils: genesis, geography, and reclamation]. M.I. Gerasimova et al. Eds. Moscow, Oikumena Publ., 2003, 270 p. (in Russian)
2. Vinogradov, A.P. [Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks in the Earth's crust]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
3. GN 2.1.7.2041-06. [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil. Hygienic standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2006, 15 p. (in Russian)
4. [State report on the environmental situation in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2019]. <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (accessed 02.15.2021). (in Russian)
5. Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. [Climate classification in the USSR]. *Izvestiya AN SSSR, Ser.geogr.*, 1959, no. 3, pp. 3–19. (in Russian)
6. Ermakov, V.V. [Biogenic migration and detoxification of mercury]. In: [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proc. of the Int. Symp., Moscow, September 7–9, 2010]. Moscow, GEOKhI RAS, 2010, pp. 8–22. (in Russian)
7. Zabolotnik, S.I., Zabolotnik, P.S. [Dynamics of soil temperature around and under the building of the Yakut thermal power plant]. *Kriosfera Zemli*, 2016, vol. XX, no. 1, pp. 70–80. (in Russian)
8. Zachinyaev, Ya.V. [Mercury and environmental safety of horses]. *NovaInfo*, 2011, no. 4. <https://novainfo.ru/article/527> (accessed: 05/25/2022). (in Russian)

9. Ivanov, V.V. [Ecological geochemistry of elements]. Guidebook in 6 volumes. Book 5. [Rare d-elements]. E.K. Burenkova, Ed. Moscow, Ekologiya Publ., 1997, 576 p. (in Russian)
10. Makarov, V.N. [Geochemical fields in the cryolithozone]. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 1998, 116 p. (in Russian)
11. Makarov, V.N., Torgovkin, V.N. [Geochemistry of technogenic deposits (the cultural layer) in the permafrost zone (by the example of Yakutsk)]. *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 3, pp. 27–39. (in Russian)
12. [Fundamentals of biogeochemistry]. V.V. Dobrovolskii, Ed. Moscow, Publ. Center “Academy”, 2003, 400 p. (in Russian)
13. Popov, G.A. [History of Yakutsk.1632–1917: Brief essays]. Volume III. Yakutsk, Yakutsk State University Publ., 2007, 305 p. (in Russian)
14. [Soil, city, ecology]. G.V. Dobrovolskii, Ed. Moscow, Foundation for Economic Literacy, 1997, 310 p. (in Russian)
15. [Air Pollution Control Guidelines]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 449 p. (in Russian)
16. Sadovnikova, L.K. [Ecological consequences of soil pollution with heavy metals]. *Biologicheskie nauki*, 1989, no. 9, pp. 47–52. (in Russian)
17. Saltykov, N.I. [On the foundations of buildings in Yakutsk]. In: [Proc. of the Obruchev Institute of Permafrost Studies. Vol. 1. Housing and small-scale industrial construction in permafrost areas]. Moscow–Leningrad, AN SSSR Publ., 1946, pp. 102–136. (in Russian)
18. Spektor, V.V., Bakulina, N.T., Spektor, V.B. [Relief and age of the alluvial cover in the Lena River valley Lena within “Yakutskii razboi”]. *Geomorfologiya*, 2008, no. 1, pp. 87–94. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-87-94>. (in Russian)
19. [Ecology of the city]. N.S. Kasimov, Ed. Moscow, Nauchymir Publ., 2004, 624 p.
20. Yanin, E.P. [Environmental aspects of the production, use and disposal of mercury thermometers in Russia]. *Ekologicheskaya ekspertiza*, 2004, no. 6, pp 2–36. (in Russian)
21. Yanin, E.P. [Technologies for purification of mercury-containing soils and rocks (foreign experience)]. In: [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proc. of the Int. Symp. Moscow, September 7–9, 2010]. Moscow, GEOKhI RAS, 2010, pp 469–471. (in Russian)
22. ACAP. Assessment of mercury releases from the Russian Federation. Prepared for the Arctic Council by the Russian Federal service for environmental, technological and atomic supervision and the Danish Environmental Protection Agency, 2005, 344 p.
23. Clarkson, T.W. Mercury: Major Issues in Environmental Health, *Environmental Health Perspectives*, vol. 100, 1993, pp. 31–38.
24. Fisher, J.A., Jacob D.J., Soerensen A.L., et al. Factors driving mercury variability in the 14 Arctic atmosphere and ocean over the past 30 years, *Global Biogeochem. Cycles*, 2013, vol. 27, pp. 1226–1235.
25. Tchounwou, P.B., Ayensu, W.K., Ninashvili, N., et al. Review: environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public health. *Environmental Toxicology*, 2003, vol. 18. no. 1, pp. 149–175.