

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 571.56

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(27-39)

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
В ГОРОДЕ ЯКУТСКЕ****В.Н. Макаров, Н.В. Торговкин***Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; vnmakarov@mpi.ysn.ru*

Выявлены геохимические особенности техногенных отложений (культурного слоя) урбанизированной территории в криолитозоне города Якутска. Наличие многолетнемерзлых пород определило геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами, характером миграции и концентрации химических элементов. Показано, что аномальные концентрации микроэлементов в городских грунтах вызваны техногенными процессами и особенностями химического состава аллювиальных четвертичных отложений. Техногенное засоление и контрастные аномалии токсичных элементов в старых районах города охватывают грунты культурного слоя и проникают в верхние горизонты аллювиальных отложений. Мощность техногенных геохимических ореолов в культурном слое зависит от возраста освоения городской территории и достигает 8–10 м.

*Геохимия, техногенные отложения, урбанизация, культурный слой, криолитозона***THE GEOCHEMISTRY OF ANTHROPOGENIC DEPOSITS IN YAKUTSK****V.N. Makarov, N.V. Torgovkin***Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; vnmakarov@mpi.ysn.ru*

The geochemical nature of the anthropogenic deposits (the cultural layer) in the urban area of Yakutsk is described. The presence of permafrost has determined the geodynamic and geochemical stability of the anthropogenic deposits, which vary in their chemical and mineral composition, structure, and physical and mechanical properties, as well as in the mode of chemical migration and concentration. It has been shown that the occurrence of anomalous concentrations of microelements in the urban soils is due to anthropogenic processes and the chemistry of Quaternary alluvial deposits. Human-induced salinization and contrasting anomalies of toxic elements in the older parts of the city occur throughout the cultural layer and extend to the upper layers of the alluvium. The thickness of the human-induced geochemical haloes in the cultural layer depends on the age of urban development, reaching 8 to 10 m.

*Geochemistry, anthropogenic deposits, urbanization, cultural layer, permafrost***ВВЕДЕНИЕ**

Геологическая деятельность человека привела к возникновению нового вида пород – техногенных отложений, в том числе “культурным наслоениям городов” [Геологический словарь, 1973, с. 59]. С археологической точки зрения техногенные отложения это “культурный слой” (неприродного происхождения), термин для обозначения слоя земли, содержащего следы деятельности человека, “постепенно формирующиеся в результате взаимодействия процессов почвообразования и разнообразной жизнедеятельности человека отложения” [Лесман, 1998, с. 30]. Авторы рассматривают термины “техногенные отложения” и “культурный слой” (КС) для территории г. Якутска как синонимы.

Природные условия местности, геологические и геохимические процессы, история развития города и характер хозяйственной деятельности человека определяют формирование техногенных отложений.

В настоящее время интенсивно изучается техногенное накопление микро- и макроэлементов в культурных слоях городов. Сведениям по накоплению химических элементов в культурном слое посвящен ряд работ по крупным городам, возрастом не более 1000 лет [Почва..., 1997; Каздым, 2002; Антропогенные почвы..., 2003; Экология..., 2004]. Между тем практически отсутствуют данные по геохимическим особенностям культурного слоя городов, расположенных в криолитозоне.

ФОРМИРОВАНИЕ КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ В ГОРОДЕ

Соотношение природных (климат, мерзлота, ландшафты, геология) и техногенных (городская инфраструктура, количество и состав загрязнителей) факторов определило существующую эколого-геохимическую ситуацию в Якутске.

Впервые характеристика КС в криолитозоне была дана Н.И. Салтыковым в статье “О фундаментах зданий г. Якутска” [1946]. Мощность этого слоя, состоящего “...из перегноя, строительного мусора и отбросов, 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.” [Салтыков, 1946, с. 102]. Интересно, что «...в “культурном” слое, обильном перегноем, надмерзлотные воды города содержат в значительном количестве примеси солей Cl, SO₄ и других, которые иногда остаются в жидком состоянии до температуры минус 3°–4°» [Там же, с. 103].

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

Условия формирования культурного слоя на территории Якутска весьма специфичны, в его верхней части ежегодно меняется картина проявления процессов сезонного промерзания и оттаивания грунтов и надмерзлотных вод. Поскольку глубина сезонного оттаивания часто меньше мощности культурного слоя грунтов, в мерзлой части

происходит образование подземного льда (ледцемент, ледяные прослойки, линзы, жилы), который является неотъемлемой частью строения техногенных отложений, преимущественно в старой части города.

За последние 30–40 лет на фоне относительной стабильности температуры многолетнемерзлых грунтов в естественных ландшафтах, сохранившихся на окраинах Якутска, в центральной части города их температура сильно изменилась. Изменения температурного поля грунтов носят однонаправленный характер в сторону повышения [Дорофеев, Сыромятников, 2013].

Нижняя граница слоя годовых теплооборотов на территории г. Якутска фиксируется на глубинах 10–12 м, иногда понижается до 15–16 м.

При анализе фактического материала [Макаров, Седельникова, 2016], полученного в ходе геокриологического мониторинга, проведенного в 2010–2012 гг. Институтом мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН под руководством В.В. Куницкого [Дорофеев, Сыромятников, 2013], установлено возрастание мощности сезонного слоя (СТС) на территории г. Якутска. В период 1963–2011 гг. мощность СТС на территории города в среднем увеличилась на 60–65 см. В старых районах, где продолжительность техногенного воздействия составляет 150–350 лет, мощность СТС возросла еще больше – на 0.84–1.07 м. В районах с возрастом застройки менее 50 лет характер СТС практически не изменился (табл. 1).

Наблюдается возрастающая зависимость мощности СТС в период интенсивного развития городской инфраструктуры (середина XX–начало XXI в.) от численности жителей административных районов г. Якутска, т. е. фактически от интенсивности техногенного давления (рис. 1).

Наличие многолетнемерзлых пород (ММП) определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся химическим и минеральным составом,

Таблица 1. Изменение мощности СТС за период 48 лет (1963–2011 гг.) в районах города с разным временем техногенеза [Макаров, Седельникова, 2016]

Период техногенного воздействия на территории города, год	Год	Мощность СТС, м			Изменение мощности СТС		Тренд, м/год	Кол-во скважин
		мин.	макс.	сред.	м	%		
320–370	1963	1.10	1.82	1.42	+0.96	+68	0.023	4
	2011	1.63	2.92	2.38				
220–270	1963	1.13	2.10	1.75	+0.84	+48	0.20	5
	2011	1.96	3.73	2.59				
120–170	1963	1.10	1.90	1.40	+1.04	+74	0.025	3
	2011	2.25	2.89	2.59				
20–70	1963	1.20	2.10	1.84	+0.07	+4	0.002	7
	2011	1.53	>10	1.91				
Среднее за 48 лет	1963	1.10	2.10	1.66	+0.64	+30	0.015	19
	2011	1.53	>10	2.30				

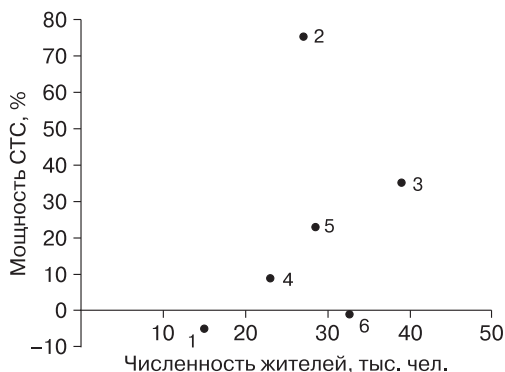


Рис. 1. Зависимость мощности СТС от численности жителей административных районов г. Якутска (середина XX–начало XXI в.).

Административный район: 1 – Автодорожный, 2 – Губинский, 3 – Октябрьский, 4 – Сайсарский, 5 – Строительный, 6 – Центральный.

строением, физико-механическими свойствами и особенностью миграции 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 (рис. 2).

На протяжении 300 лет, до середины 50-х гг. XX в., г. Якутск представлял собой, по существу, большую деревню. “Если посмотрите с внешней стороны, то увидите огромные дворы со всевозможными хозяйственными постройками и приспособлениями. Чуть ли не в каждом дворе заметите хлева для рогатого скота, загоны и конюшни для лошадей, огороды и т. д.” [Попов, 2007, с. 102]. Вот как описывает санитарное состояние города этот автор [Попов, 2007]: «Город и прилегающие к нему окрестности загажены всякого рода отбросами. Эта картина без преувеличения может быть отнесена к Якутску начала XIX столетия и до са-

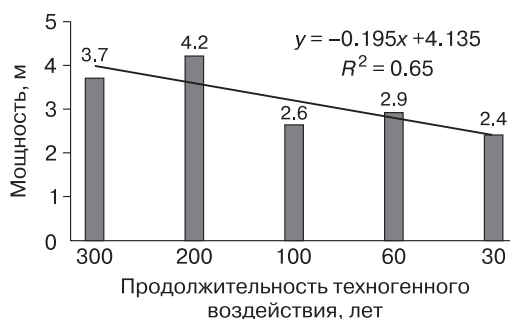


Рис. 2. Зависимость мощности культурного слоя от продолжительности техногенного воздействия.

мого последнего момента. По улицам летом невообразимая пыль, и такая иногда, что пеленой покрывает весь город. Подъезжая к городу, особенно вечером, почти всегда можно видеть над ним пыльный туман. В период дождей и весной во время таянья снега город буквально тонет в грязи. Зыбуны по улицам – обычное явление. Озера в самом городе уже давно загрязнены, и вода в них крайне недоброкачественная... Озера не раз заваливались отбросами и нечистотами. ...Город кольцом окружен городскими свалками, и обыватель, отправляясь “подышать свежим воздухом”, сначала пробирается через тропы, проложенные у свалочных окопов. Летом свалки сжигаются и дым от них также нередко обволакивает город. Вся эта обстановка создает нездоровые условия для города. Гастрические заболевания, особенно в июле и августе, по преимуществу у детей, являются обычными. Тиф не выводится, принимая иногда эпидемический характер. Имеет место и малярия. Эти заболевания, безусловно, связаны с общим антисанитарным состоянием города и окрестностей» (с. 152).

До середины XX в. в городе не осуществлялся централизованный постоянный вывоз всех отхо-



Рис. 3. “Вросшие” в землю дома г. Якутска.

дов или смыв мелкого мусора, и поступление отходов намного превышало их вывоз с территории города.

Показательный пример сформировавшегося КС – уровень современной поверхности в старой части Якутска, который нередко оказывается расположенным гораздо выше оснований цокольных этажей многих зданий. Визуально кажется, что строения “вросли” в грунт. На самом же деле это вокруг них “вырос” КС (рис. 3).

В результате более чем трехвекового освоения городской территории в Якутске сформировалась локальная биотехносфера. Однако формирование современных техногенных отложений на территории города началось с середины 1950-х гг., когда изменился характер хозяйственной жизни города.

Геохимическая характеристика отложений КС получена авторами в результате многолетнего площадного литохимического мониторинга “городских почв” и изучения керна буровых скважин. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения, от современных

возрастом менее 50 лет до древних 300–350-летних. Их сопоставление позволяет судить о химическом составе КС в каждой из пяти выделенных областей урбанизации, которые различаются возрастом городской застройки, а следовательно, и техногенного воздействия (рис. 4).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Формирование КС, состоящего из перегноя, строительного мусора и отбросов, обуславливалось содержанием на его территории большого числа лошадей и коров, печным отоплением, отсутствием канализации, что отразилось на накоплении органического вещества. В условиях криолитозоны и в анаэробной среде при отсутствии кислорода органическое вещество в КС 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. Навоз был существенной составляющей КС Якутска и накапливался на его территории со дня основания города на протяжении почти 300 лет. И только с середины XX в. при изменении хозяйственной жизни города (пуск городского канализационного коллектора, замена лошадей автомобилями, прекращение выпаса скота и др.) навоз перестал поступать в городские грунты. В результате изменился химический состав КС в городе, что хорошо заметно по резкому понижению концентрации соединений азота в отложениях возрастом менее 50 лет (табл. 2).

Глубина распространения аномального количества азота (>0.01 мг-экв.) в грунтах повышается с увеличением возраста городской застройки: если в молодых 50-летних грунтах она составляет не более 3 м, то в 100-летних уже около 6.5 м, а в наиболее старых 200–300-летних – до 8.5 м (табл. 3).

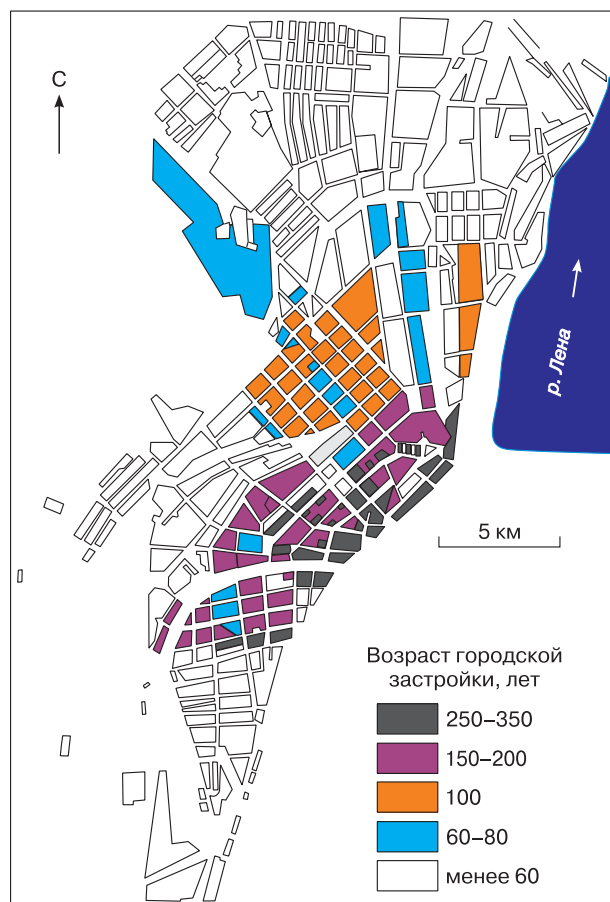


Рис. 4. Возраст городской застройки Якутска (составлено по планам и картам города с начала XVIII в. по настоящее время).

Таблица 2. Содержание азота в грунтах на территории города с разным возрастом застройки, мг-экв.

Глубина, м	300 лет	100 лет	50 лет
	Скв. 3	Скв. 14	Скв. 4
1	0.010	0.008	0.008
2	0.015	0.010	0.006
3	0.016	0.060	0.015
4	0.032	0.009	0.005
5	0.117	0.011	0.004
6	0.079	0.042	0.005
7	0.152	0.009	0.005
8	0.047	0.007	0.004
9	0.007	0.009	0.007

Примечание. Сумма NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ в пересчете на N.

Жирным шрифтом выделены аномальные значения N.

Интенсивность накопления в грунтах аномального количества соединений азота уменьшается в ряду: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^-$. Преимущественное содержание иона NO_3^- конечного продукта окисления азота свидетельствует о старом загрязнении грунтов.

Культурный слой отличается высоким содержанием фосфатов, натрия, калия, кальция, магния. Высокие концентрации фосфатов связаны в основном с процессами разложения органического вещества, бытовых отходов. Концентрация фосфатов в грунтах КС максимальна в его верхней части в пределах распространения сезонноталых грунтов – 850–1125 мг/кг и понижается до 775–925 мг/кг в многолетнемерзлых слоях КС. В нижележащих многолетнемерзлых аллювиальных отложениях содержание фосфатов снижается до фоновых значений – 625 мг/кг.

В “старых” грунтах КС возрастом 100–350 лет глубина распространения аномальных концентраций фосфатов практически одинакова (5–6 м) и уменьшается в более молодых 70-летних до 2–4 м, а в городских районах современной застройки аномалий фосфатов не наблюдается.

Кальций и магний поступают в грунты КС обычно из различного строительного материала (известняка, строительного раствора, цемента, бетона). Биофильные элементы (калий и натрий) накапливаются вследствие разложения органического вещества, в основном древесины, кроме того, источником калия является зола. Аномальное содержание калия 0.2–0.6 мг-экв. наблюдается только в верхней части КС в зоне распространения сезонноталых грунтов с максимальной продолжительностью техногенного воздействия (более 200 лет).

Сравнение содержания катионов в сезонноталых и мерзлых грунтах КС и аллювиальных отложениях представлено в табл. 4.

Максимальная контрастность накопления катионов в грунтах КС по сравнению с аллювиальными отложениями свойственна Na^+ , минимальная – K^+ и может быть представлена рядом $(\text{КС}/\text{Q}_{\text{al}}): \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$.

Таблица 3. Глубина проникновения соединений азота* в грунты Якутска, м

Соединения азота	Возраст культурного слоя, лет				
	300	200	100	70	<50
NH_4^+	8.5	5.5	7.0	1.5	2.7
NO_2^-	6.5	6.5	6.5	8.5	1.5
NO_3^-	10.0	10.0	5.5	3.5	2.2
ΣN	8.3	7.3	6.3	4.5	3.0

* Химические анализы выполнены в лаборатории геохимии ИМЗ СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518584, от 05.06.2011 г.), аналитики Л.Ю. Бойцова и О.В. Шепелева.

Наиболее равномерно среди катионов соотношение содержания в сезонноталых ($\text{КС}_{\text{СТС}}$) и мерзлых грунтах ($\text{КС}_{\text{ММП}}$) культурного слоя $(\text{КС}_{\text{СТС}}/\text{КС}_{\text{ММП}})$ характерно для ионов Mg^{2+} . Максимальное понижение содержания в $\text{КС}_{\text{ММП}}$ по сравнению с $\text{КС}_{\text{СТС}}$ свойственно ионам Na^+ – в 2.2 раза. По уменьшению концентрации катионов в $\text{КС}_{\text{ММП}}$ по сравнению с $\text{КС}_{\text{СТС}}$ катионы группируются в следующий ряд: $\text{Na}^+ > \text{K}^+, \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$.

Сравнение содержания анионов в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя и аллювиальных отложениях представлено в табл. 5.

Максимальная контрастность накопления анионов в грунтах КС по сравнению с аллювиальными отложениями свойственна Cl^- , минимальная – HPO_4^{2-} и может быть представлена рядом $(\text{КС}/\text{Q}_{\text{al}}): \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-, \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{HPO}_4^{2-}$.

Соотношение содержания анионов в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя $(\text{КС}_{\text{СТС}}/\text{КС}_{\text{ММП}}): \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{HPO}_4^{2-}$, свидетельствует о максимальной подвижности в грунтах $\text{КС}_{\text{ММП}}$ нитратов и хлоридов.

Аналогичные ряды миграции катионов и анионов, обладающих разной подвижностью в мерзлых грунтах при температуре -6°C , были экспериментально установлены ранее Ю.П. Лебедеко [1988]: катионы – $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, анионы – $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.

В мерзлых грунтах КС города, вероятно, создаются наиболее благоприятные условия для ми-

Таблица 4. Содержание катионов в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя

Ионы	Содержание, мг-экв.				$\text{КС}_{\text{СТС}}/\text{КС}_{\text{ММП}}$	$\text{КС}_{\text{ММП}}/\text{Q}_{\text{al}}$	$\text{КС}/\text{Q}_{\text{al}}$
	$\text{КС}_{\text{СТС}}$	$\text{КС}_{\text{ММП}}$	КС	Q_{al}			
Ca^{2+}	0.340	0.190	0.270	0.130	1.8	1.5	2.1
Mg^{2+}	0.170	0.160	0.165	0.070	1.1	2.3	2.4
K^+	0.035	0.020	0.030	0.020	1.8	1.0	1.5
Na^+	0.520	0.240	0.380	0.110	2.2	2.2	3.4

Примечание. $\text{КС}_{\text{СТС}}$ – катионы в сезонноталых грунтах культурного слоя; $\text{КС}_{\text{ММП}}$ – катионы в мерзлых грунтах культурного слоя; КС – катионы в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя; Q_{al} – катионы в аллювиальных отложениях.

Таблица 5. Содержание анионов в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя

Ионы	Содержание, мг-экв.				КС _{СТС} /КС _{ММП}	КС _{ММП} /Q _{ал}	КС/Q _{ал}
	КС _{СТС}	КС _{ММП}	КС	Q _{ал}			
HCO ₃ ⁻	0.45	0.21	0.33	0.18	2.1	1.2	1.8
SO ₄ ²⁻	0.40	0.18	0.29	0.09	2.2	2.0	3.2
Cl ⁻	0.27	0.16	0.26	0.06	1.7	2.7	4.3
NO ₃ ⁻	0.03	0.021	0.024	0.007	1.4	3.0	3.4
HPO ₄ ²⁻	850	775	813	625	1.1	1.2	1.3

Примечание. КС_{СТС} – анионы в сезонноталых грунтах культурного слоя; КС_{ММП} – анионы в мерзлых грунтах культурного слоя; КС – анионы в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя; Q_{ал} – анионы в аллювиальных отложениях. Содержание HPO₄²⁻ в мг/кг.

грации солей при отрицательных температурах (-3...-5 °С), когда значительное количество воды находится в пленках поровых растворов, но мало связано с минеральной частью, а влагопроводимость мерзлых грунтов максимальна.

Для аллювиальных многолетнемерзлых отложений характерна слабокислая реакция среды, в среднем рН = 6.81. Слабокислая, близкая к нейтральной, величина рН сохраняется и в вышележащих мерзлых грунтах КС в интервале глубин 3–6 м. Реакция среды сезонноталых грунтов – верхней части КС – слабощелочная, в интервалах рН = 7.18–7.73.

Повышенная щелочность городской среды в сезонноталых грунтах КС и особенно в городских почвах (повышение рН иногда до 9) создает возможность существования слабощелочных и сильнощелочных (содовых) классов геохимических барьеров.

Сведениям о накоплении микроэлементов в культурном слое посвящен ряд работ по крупным городам, где особое внимание уделяется токсичным тяжелым металлам – Pb, Cd, As, Hg [Нежданова и др., 1984; Макаров, 1985; Садовникова, 1989; Почва..., 1997; Антропогенные почвы..., 2003; Экология..., 2004]. Однако в литературе практически отсутствуют данные о геохимических особенностях КС городов, расположенных в криолитозоне.

Накопление микроэлементов в техногенных городских отложениях может быть связано не только с деятельностью человека, но и с высоким содержанием элементов в естественных горных породах, на которых сформировался КС.

Современные (голоценовые) аллювиальные отложения в долине р. Лены, представляющие собой почвообразующий субстрат, являются исходным поставщиком продуктов гипергенного выветривания и имеют исключительное значение для

Таблица 6. Сравнение концентрации микроэлементов** в аллювиальных отложениях (Q_{ал}) с кларком земной коры (КЗК)*, мг/кг

Химический элемент	Q _{ал}	КЗК	Q _{ал} /КЗК	Химический элемент	Q _{ал}	КЗК	Q _{ал} /КЗК
Li	22	32	0.7	Ge	1.2	1.4	0.9
Be	1	3,8	0.3	As	0.96	1.7	0.6
B	21	12	1.8	Y	17	20	0.8
P	800	930	0.9	Nb	15	20	0.8
Sc	10	10	1.0	Mo	1.6	1.1	1.4
Ti	5000	4500	1.1	Ag	0.08	0.07	1.1
V	36	90	0.4	Cd	0.65	0.13	5.0
Cr	59	83	0.7	Sn	2.7	2.5	1.1
Mn	550	1000	0.6	Yb	0.80	0.33	2.4
Co	6	18	0.3	W	2	1.3	1.5
Ni	24	58	0.4	La	1.8	29	0.1
Cu	20	47	0.4	Pb	24	16	1.5
Zn	65	83	0.8	Bi	1	0.009	100
Ga	14	19	0.7	Hg	30	83	0.4

Примечание. Содержание Hg в мг/т. Количество скважин – 71.

* КЗК, по: [Виноградов, 1962].

** Атомно-эмиссионный анализ выполнен в Центральной геологической лаборатории ГУГПП “Якутскгеология” (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511039).

Таблица 7. Коэффициент концентрации химических элементов в аллювиальных отложениях в районе Якутска

Породы	Коэффициент концентрации (относительно КЗК)				Кол-во проб
	<0.5	0.7–1.0	1.0–1.5	1.5–2.0	
Аллювиальные отложения	V, Co, Ni, Cu, La, Be, Hg	P, Cr, Mn, Y, Zn, Ga, Ge, Nb, Yb, Sc, Li	Ti, Mo, Sn, Ag	B, Pb, W	190

Примечание. Составлено по: [Макаров, 1985; Подъячев, 2009; Макаров, Седельникова, 2016].

формирования современного элювия и почв. Аллювиальные отложения четвертичного возраста во многом определили минералогический и химический состав КС.

Химический состав аллювиальных отложений (в интервале глубин 10–20 м) в районе г. Якутска и сравнение с кларком земной коры (КЗК) приведено в табл. 6.

По химическому составу аллювиальные отложения слабокислые, близкие к нейтральным (рН = 6.81), слабоминерализованные (величина засоленности в среднем 0.025 %), сульфатно-гидрокарбонатные, смешанные по катионам, с относительно высоким содержанием аммония.

Результаты сравнения с КЗК показывают, что аллювиальные четвертичные отложения в районе города геохимически специализированы на лито- и халькофильные элементы: В, W, Pb, Ti, Sn, Mo, Ag, содержание которых превышает кларковые значения в 1.2–2 раза (табл. 7). Тяготеют к ним Р и Ge, количественно близкие к кларковым.

Наблюдается существенная разубоженность песчано-глинистых и песчаных пород элювия преимущественно литофильными элементам: V, Co, Ni, Cu, La, Be, Hg, дефицитными по отношению к КЗК, содержание которых фиксируется на уровне значений менее 0.5 КЗК. Концентрация большинства микроэлементов этой группы возрастает в техногенных отложениях, но остается на уровне отрицательной аномалии.

Максимальная геохимическая трансформация наблюдается в верхнем слое городских почв (0–0.2 м), где в процессе антропогенного воздействия существенно возросла контрастность по сравнению с уровнем КЗК, группы халькофильных (Hg, Zn, Pb, Ag, Tl) и некоторых литофильных (В, Mn, Y) химических элементов.

Величина контрастности техногенных геохимических аномалий – отношение среднего содержания микроэлементов в разновозрастных грунтах КС и аллювиальных отложениях – приведена в табл. 8.

Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к химическому составу аллювиальных отложений (>5) свойственна ионам (макрокомпонентам) солевого состава грунтов культурного слоя: Cl⁻, NO₃⁻, K⁺,

Na⁺, NO₂⁻, SO₄²⁻ и литохимическим аномалиям Hg и Ag.

Ряды понижения контрастности макрокомпонентов в техногенных отложениях по сравнению с химическим составом аллювиальных отложений:

анионы: Cl > NO₃ > NO₂ > SO₄ > HCO₃;

катионы: K > Na > Mg > Ca.

“Древние” грунты культурного слоя возрастом около 300 лет вскрыты буровой скважиной, пройденной на территории городского района “Старый город”. На карте “Плань города Якутска 1770 года” [Понов, 2007] место расположения скважины – в районе Гостиных дворов. К концу XVIII в. эта территория уже была хорошо освоена. Здесь располагалась церковь Преображение Господне, гостиные дворы, многочисленные дворовые постройки.

Мерзлотно-литологическая и геохимическая характеристика “древних” грунтов КС приведена в табл. 9.

Разрез отложений, вскрытых скважиной, представлен почвенно-растительным слоем мощностью около 0.5 м; в интервале 0.5–1.5 м – сезоннотальными грунтами КС – суглинок черного цвета с органикой и древесной щепой; 1.5–4.0 м – мерзлыми грунтами КС – песок, глина и суглинок. По керну мощность грунтов КС оценивается в 4.0 м, что соответствует усредненным данным о мощности КС в районах города с продолжительностью техногенного воздействия около 300 лет (см. рис. 2). С 4 м и до забоя скважины (12 м) залегают аллювиальные отложения четвертичного возраста: песок серый, среднезернистый, твердомерзлый, льдистый.

Таблица 8. Контрастность техногенных геохимических аномалий (КС) по отношению к Q_{ал}

КС/Q _{ал}	Химический элемент
>10	Cl, NO ₃ , K, Na, NO ₂
5–10	Hg, S
3–5	Mg, Ag, C, Ca
2–3	Li, V, Co, Zn, W, Pb
1.5–2	P, Cr, Ni, Cu, Ge, NH ₄ , Sn
~1	Ti, Mn, Ga, Y, Mo, Bi, Nb, B; рН

Таблица 9. Литолого-геохимическая характеристика “древних” грунтов культурного слоя

Глубина, м	Краткое описание грунта	рН	Соленость, %	Cl ⁻	Zn	Pb	Mn	Ag
				мг-экв.				
<i>Сезонноталый грунт культурного слоя</i>								
0.0–0.5	Почвенно-растительный слой	7.76	0.075	0.24	150	85	1500	0.15
0.5–1.0	Суглинок черного цвета с органикой, древесной щепой, талый	6.80	0.13	0.37	150	100	1100	5.00
1.0–1.5	Суглинок коричневого цвета с органикой, влажный, талый	7.15	0.12	0.31	150	60	970	2.40
<i>Мерзлый грунт культурного слоя</i>								
1.5–1.8	Песок среднезернистый, коричневого цвета, включающий органику	7.50	0.11	0.29	150	25	1100	2.60
1.8–2.7	Глина коричневого цвета, включающая органику	7.50	0.11	1.25	150	20	700	0.12
2.7–4.0	Суглинок светло-желтый, включающий органику	6.86	0.35	2.38	125	17	800	0.30
<i>Многолетнемерзлый аллювий</i>								
4.0	Песок серый, среднезернистый, твердомерзлый, льдистый	7.35	0.32	2.32	100	20	700	0.05
5.0		7.45	0.30	2.43	85	20	600	0.10
6.0		7.60	0.28	2.54	50	20	500	0.10
7.0		7.25	0.14	0.99	50	20	500	0.15
8.0		7.62	0.12	0.91	70	20	500	0.10
9.0		7.26	0.06	0.34	70	20	500	0.15
10.0		7.00	0.05	0.20	70	20	500	0.10
11.0		7.00	0.03	0.08	70	20	500	0.10
12.0		7.10	0.02	0.11	70	20	500	0.15

Примечание. Район “Старый город” Якутска, ул. Чернышевского, 18А. Литологическое описание грунтов выполнено И.В. Дорофеевым и И.И. Сыромятниковым. Жирным шрифтом выделены аномальные значения компонентов.

Химически грунты КС отличаются: 1) преимущественно щелочной реакцией среды (в среднем $\text{pH} = 7.26$); 2) повышенной засоленностью (в среднем 0.075–0.35 %) за счет присутствия хлоридов; 3) аномальной концентрацией тяжелых металлов (Zn, Pb, Mn, Ag), которая в 2–5 раз (до 50 для серебра) выше, чем в незатронутых техногенном аллювиальных отложениях. Сезонноталые и мерзлые грунты КС практически однородны в геохимическом отношении. Однако в мерзлых грунтах КС глубже 1.5 м уже отсутствуют аномальные концентрации Pb, характерные для сезонноталых грунтов, и наблюдается резкое повышение содержания хлоридов в нижних горизонтах в интервале глубин 1.8–4.0 м.

Верхняя часть разреза многолетнемерзлых аллювиальных отложений, вскрытых скважиной, испытала существенное техногенное воздействие. Об этом свидетельствуют щелочные значения грунтов, повышенная засоленность и высокое содержание Cl⁻ в грунтах, прослеживаемые до глубины 9 м. В то же время в мерзлом аллювии уменьшился спектр тяжелых металлов и слабоконтрастные аномалии Zn и Mn наблюдаются только в верхней части аллювиальных песков до глубины около 5 м (см. табл. 9).

Характеристика химического состава более молодых грунтов культурного слоя возрастом техногенеза 80–100 лет, вскрытых котлованом на территории города, представлена на рис. 5 и в табл. 10.

Мощность грунтов культурного слоя (Б, В, Г на рис. 5) составляет 4.2 м. Для них характерна слабощелочная реакция, повышенная засоленность за счет возрастания концентрации гидрокарбонатов, сульфатов и нитратов, слабоконтрастная аномалия тяжелых металлов (Zn, Pb, Hg), концентрация которых в 2–3 раза выше, чем в подстилающих аллювиальных отложениях (А). Сезонноталые (Г) и мерзлые (Б и В) грунты культурного слоя практически однородны в геохимическом отношении. Однако в грунтах КС_{СТС} наблюдается незначительное повышение содержания практически всех химических компонентов по сравнению с КС_{ММП} (максимальное для ртути – в 1.8 раза). Характерно существенное накопление в мерзлых грунтах КС нитратов (0.027–0.071 мг-экв.), указывающее на присутствие “старой” органики, в то время как в грунтах СТС содержание NO₃⁻ составляет всего 0.003 мг-экв. (см. табл. 10).

Мерзлотно-литологическая и геохимическая характеристика наиболее молодых грунтов города

дается по буровой скважине № 6 (табл. 11). Скважина находится в 202-м микрорайоне Якутска на искусственно созданных намывных грунтах. Первые экспериментальные крупнопанельные дома в микрорайоне были сданы в эксплуатацию в 1985 г. Это один из наиболее молодых районов города с продолжительностью техногенного влияния около 30 лет.

Отложения, вскрытые скважиной, имеют трехслойное строение: 1) талые намывные грунты мощностью 4.1 м (песок серо-коричневый, мелко- и среднезернистый); 2) мерзлые намывные грунты мощностью 3.8 м, в интервале глубин 4.1–8.0 м (песок, аналогичный вышележащему, с маломощным прослоем супеси); 3) оттаявшие после намыва аллювиальные отложения в интервале глубин 8.0–9.4 м (темно-серые пески и суглинки).

По химическому составу грунты в скважине преимущественно щелочные, слабозасоленные (0.01–0.03 %), гидрокарбонатно-кальциевые; в аллювиальных отложениях – гидрокарбонатно-кальциево-натриевые.

Слабая аномалия тяжелых металлов (Zn, Mn, Pb, Hg), в 2–3 раза превышающая фоновое содержание в подстилающих аллювиальных отложениях, наблюдается только в поверхностном грунтовом горизонте (0–0.5 м). Образование слабоконтрастной аномалии Zn, Pb, Hg, Li, Cu на глубине 3.8–4.1 м в кварц-полевошпатовых песках, возможно, связано с загрязнением грунтов металлом при бурении, на что указывает высокое содержание W (15 мг/кг).

Тридцатилетнее техногенное воздействие на территории 202-го микрорайона Якутска практически не вызвало существенного изменения химического состава намывных песков и привело к формированию слабоконтрастной геохимической аномалии тяжелых металлов только в поверхностном промерзающем грунтовом горизонте (0–0.5 м).

Техногенные геохимические аномалии в сезонноталых ($KC_{СТС}$) и мерзлых ($KC_{ММП}$) грунтах культурного слоя Якутска различаются по уровню концентрации химических компонентов. Контрастность аномалий в грунтах КС по отношению к

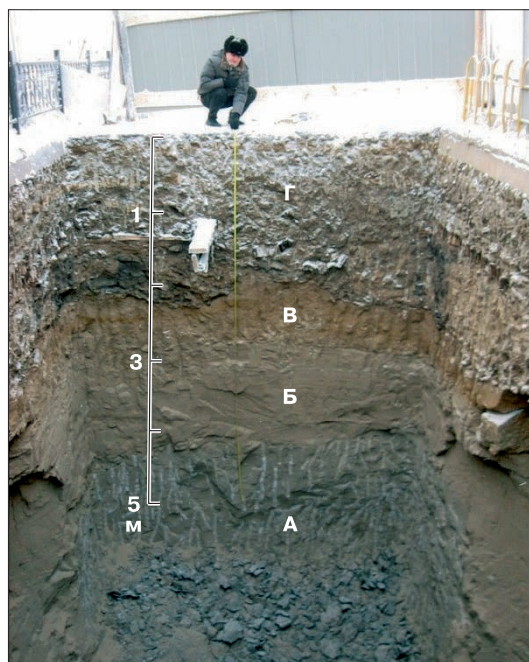


Рис. 5. Культурный слой (возраст 80–100 лет) и подстилающие грунты в Якутске, вскрытые котлованом:

А – аллювий; Б–Г – грунты культурного слоя (Б – мерзлые грунты, нижняя часть; В – мерзлые грунты, средняя часть; Г – сезоннопротаивающие грунты, верхняя часть). Фото И.В. Дорофеева.

содержанию в аллювиальных отложениях изменяется в $KC_{СТС}$ от 1.09 (pH) до 7.18 (Hg) и в среднем составляет 3.05, а в $KC_{ММП}$ – от 1.01 (Mn) до 5.43 (Cl^-), в среднем 2.10, т. е. меньше примерно на треть.

Наибольшая контрастность миграции в $KC_{СТС}/KC_{ММП}$ характерна для ртути, содержание которой в $KC_{ММП}$ в 5 раз меньше, чем в $KC_{СТС}$, что можно объяснить снижением миграционной способности Hg при понижении температуры грунтов.

Установлена зависимость мощности и состава химических элементов техногенных геохимиче-

Таблица 10. Химический состав грунтов культурного слоя (возраст 80–100 лет)

Слой (см. рис. 5)	Глубина, м	Мерзлота	pH	Соле- ность, %	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	Zn	Pb	Hg	
					мг-экв.				мг/кг		мг/т	
Культурный слой	Г	0–1.4	СТС	6.93	0.050	0.49	0.34	0.06	0.003	50	20	26
	В	1.4–2.6	ММП	7.39	0.040	0.57	0.17	0.04	0.027	30	15	14
	Б	2.6–4.2		7.44	0.045	0.54	0.25	0.03	0.071	50	15	15
	В+Б	1.4–4.2		7.42	0.042	0.56	0.21	0.03	0.049	40	15	14
Аллювий	А	4.2–5.0		6.50	0.020	0.17	0.09	0.03	0.001	20	10	4.8

Примечание. Жирным шрифтом выделены аномальные значения компонентов.

Таблица 11. Литолого-геохимическая характеристика культурного слоя (возраст 30 лет) (буровая скв. 6, 202-й мкрн.)

Глубина, м	Краткое описание грунта	рН	Соле- ность, %	Cl ⁻	Zn	Pb	Mn	Hg
				мг-экв.	мг/кг			мг/т
<i>Сезонноталый грунт культурного слоя</i>								
0.0–3.8	Песок серо-коричневый, мелко- и средне-зернистый, кварц-полевошпатовый с включением мелкой гальки, талый	6.87	0.018	0.025	100	30	700	23
		7.71	0.01	0.02	50	10	500	3
		7.22	0.01	0.02	30	10	500	5
		7.09	0.01	0.02	50	10	300	3
3.8–4.1	Песок серо-коричневый, аналогичный вышележащему грунту, сильно увлажненный, талый	7.05	0.02	0.03	100	15	200	7
<i>Мерзлый грунт культурного слоя</i>								
4.1–5.75	Песок серо-коричневый, мелко- и средне-зернистый, кварц-полевошпатовый с включением мелкой гальки и прослоями супеси, мерзлый	6.59	0.01	0.02	30	10	200	3
5.75–7.2	Песок желто-серый, разнотекстурный, слабомерзлый с массивной криогенной текстурой	8.11	0.01	0.02	20	10	200	3
7.2–8.0	Песок желто-серый, среднетекстурный, с тонкими (2–3 см) прослоями темно-серой супеси, слабомерзлый с массивной криогенной текстурой	7.11	0.02	0.02	30	10	300	6
<i>Аллювиальные отложения</i>								
8.0–8.4	Песок темно-серый, мелкий с прослоями супеси и легкого суглинка, влажный, талый	7.11	0.02	0.02	30	10	300	6
8.4–9.4	Суглинок темно-серый с тонкими прослоями торфянистого суглинка и песка, талый	7.41	0.03	0.05	70	10	200	9

Примечание. Жирным шрифтом выделены аномальные значения компонентов.

ских ореолов в КС от возраста освоения городской территории. В старых районах города, где продолжительность техногенного воздействия превышает 200 лет, геохимические аномалии, мощность которых превышает 5 м, формирует более обширный комплекс микрокомпонентов (табл. 12).

Химический состав аллювиальных отложений и характер трансформации солевого состава и спектра аномальных микроэлементов в сезонноталых и мерзлых грунтах культурного слоя приведен в табл. 13 и на мерзлотно-геохимическом разрезе (рис. 6).

Таблица 12. Зависимость мощности техногенных геохимических ореолов от возраста освоения городской территории

Возраст освоения	Мощность техногенных ореолов, м					
	10–8	8–6	6–5	5–3	3–2	2–1
350	Hg, NO ₃ , NH ₄	Na, S, Cl, NO ₂	Ca, Mg, C, Ti, V, Mn, Co, Zn, Y	Ag, Ni, Sn, Cu	P, Cr, Ge, B, K	Pb, Mo
200	Hg, NO ₃	Zn, NO ₂	Mo, Ag, Sn, NH ₄	Ti, V, Cr, Na, S, Cl, Ca, Mg, C, K	Li, Co, Cu, Y	Ga, Pb
100	Zn	C, NH ₄ , Ag, Co, NO ₂	Cl, P, Ti, NO ₃	Ca, Na, V, Mg, Li, Mo, Hg	Mn, Cr, Ni, Zn, Ag	Co, Cu, Pb
≤70	–	NO ₂	Ti, NO ₃	Mn, Co, Pb	Cl, Na, S, Cl, Ca, Mg, C, Ni	P, V, Cr, Cu, Zn, Ga, Ge, Ag, Sn, Hg, NH ₄

Таблица 13. Химический состав аллювиальных отложений (Q_{al}) и грунтов культурного слоя (КС)

Грунты	Химический состав (C- HCO_3^- ; S- SO_4^{2-})	Аномальные компоненты*
КС _{СТС}	$0.096 \frac{C\ 39\ S\ 35\ Cl\ 23}{Na\ 48\ Ca\ 32\ Mg\ 16}$ pH 7.4	Hg (7), NO_3 , Ag (3), P, Zn, Pb, Sn (1.5)
КС _{ММП}	$0.078 \frac{C\ 37\ S\ 32\ Cl\ 28}{Na\ 39\ Ca\ 31\ Mg\ 26}$ pH 7.0	NO_3 (6), Ag (2), Hg, P, Zn, Pb, Sn (1.5)
Q_{al}	$0.025 \frac{C\ 52\ S\ 32\ Cl\ 16}{Ca\ 33\ Na\ 31\ Mg\ 23\ NH_4\ 10}$ pH 6.8	W, Pb, B (1.5–2.0), Ag, Sn, Mo, Ti (1.1–1.5)

* В скобках – отношения КС/ Q_{al} и Q_{al} /КЗК (в последней строке).

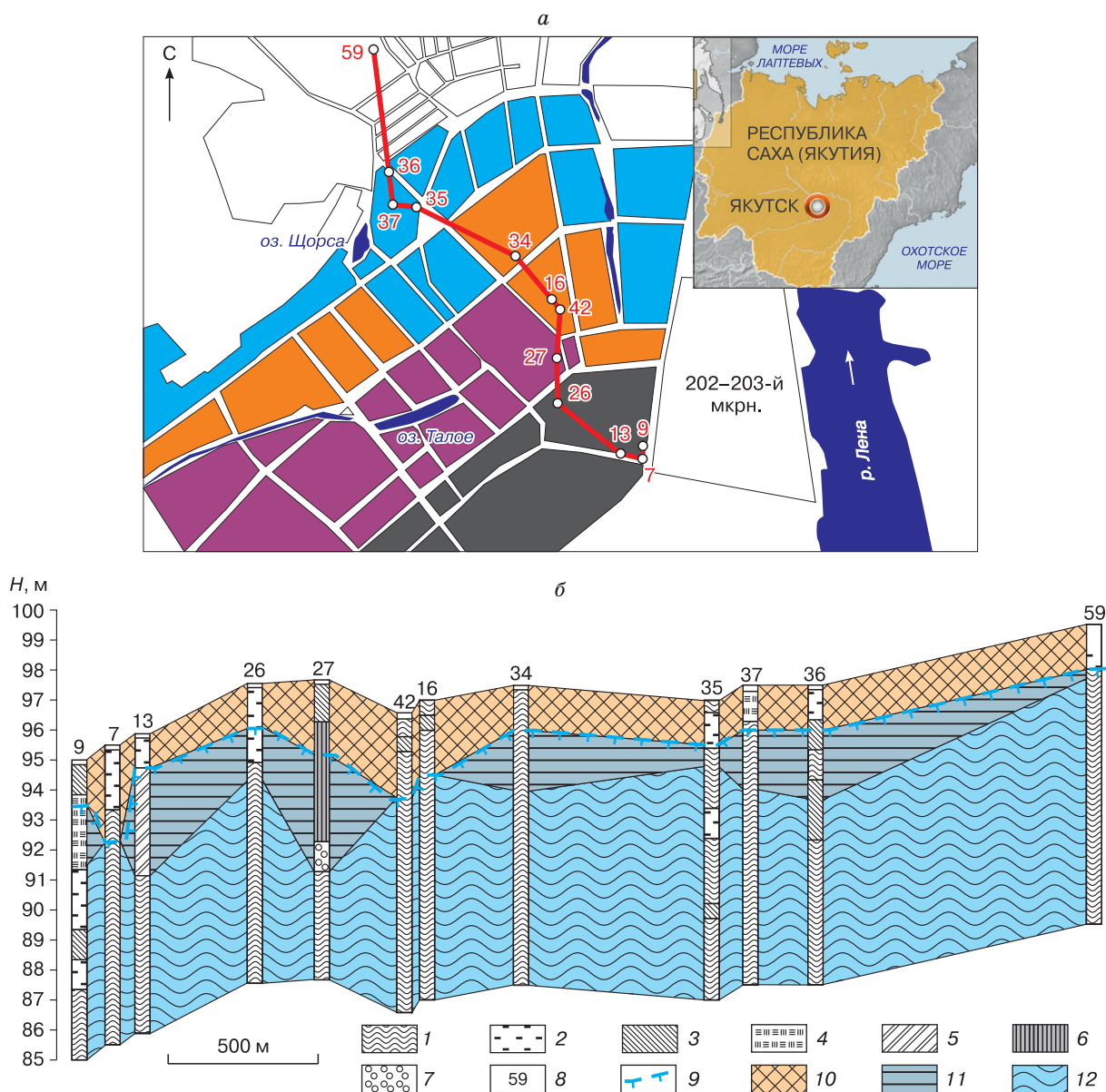


Рис. 6. Возраст городской застройки (а) и мерзотно-геохимический разрез техногенных отложений (б).

а – увеличенный фрагмент рис. 4. Красная линия – линия расположения мерзотно-геохимического разреза на территории города; цифры – номера скважин на разрезе; ост. обозн. см. на рис. 4; б – культурный слой; 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – торф; 5 – лед; 6 – железобетон; 7 – дерево; 8 – номер скважины; 9 – кровля ММП; 10, 11 – техногенные отложения (10 – сезонноталые, 11 – мерзлые); 12 – мерзлый аллювий.

ВЫВОДЫ

- Впервые проведено геохимическое изучение отложений культурного слоя урбанизированной территории в г. Якутске.

- В результате более чем 300-летнего освоения городской территории в Якутске сформировалась локальная криобиотехносфера, качественные и количественные геохимические характеристики которой зависят от продолжительности и плотности техногенного влияния.

- Формирование литологических и геохимических параметров культурного слоя в г. Якутске происходило в два исторических этапа: первый (“деревенский”) продолжался более 300 лет, со дня начала застройки территории (1642 г.) до середины 1950-х гг.; второй (“городской”), когда в последние 60–70 лет сформировалась собственно урбанизированная территория. Многолетнее промерзание пород определило специфические условия формирования толщи техногенных отложений с различным химическим и минеральным составом, разным строением, физико-механическими свойствами и особенностью миграции химических элементов.

- Концентрирование микроэлементов в городских грунтах обусловлено их поступлением в отложения при техногенном воздействии и геохимическими свойствами аллювиальных четвертичных отложений, обогащенных W, В, Pb, Ti, Sn, Mo, Ag и дефицитных на V, Co, Ni, Cu, La, Be, Hg, содержание которых фиксируется на уровне значений 0.5 (<КЗК).

- Геокриологические условия на территории Якутска (мощность ММП 250–450 м, СТС – 1.5–2.5 м, температура грунтов на глубине 10 м равна –2...–6 °С) обусловили формирование двуслойного КС: в сезонноталом слое и в толще многолетнемерзлых пород, различающихся по геохимическим показателям.

- Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к химическому составу аллювиальных отложений свойственна ионам – макрокомпонентам солевого состава, Cl⁻ (29), NO₃⁻ (18), K⁺ (16), Na⁺ (14), NO₂⁻ (12), SO₄²⁻ (5), Hg (5) (в скобках указан коэффициент контрастности).

- Техногенное засоление и контрастные аномалии макро- и микроэлементов в старых районах города охватывают породы культурного слоя и верхние горизонты аллювиальных отложений (иногда до 5–6 м). Мощность техногенных геохимических аномалий в грунтах культурного слоя и кровле аллювиальных отложений зависит от возраста освоения городской территории и достигает 9–10 м.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05050 p_восток_a).

Литература

Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / М.И. Герасимова и др. М., Ойкумена, 2003, 270 с.

Gerasimova, M.I., et al. (Eds.), 2003. Anthropogenic soils: their genesis, geography, and reclamation. Oikumena, Moscow, 270 pp. (in Russian)

Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962, № 2, с. 555–572.

Vinogradov, A.P., 1962. The Average Percentage of Chemical Elements in the Main Types of Erupted Rocks of the Earth's Crust. Geokhimiya 2, 555–572.

Геологический словарь / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М., Недра, 1973, т. 2, 456 с.

Pfaffengolts, K.N. et al. (Eds.), 1973. Geological dictionary. Nedra, Moscow, vol. 2, 456 pp. (in Russian)

Дорофеев И.В., Сыромятников И.И. Вековые изменения температуры многолетнемерзлых грунтов в Якутске // Вопр. географии Якутии. Вып. 11. Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны. Якутск, Изд-во СМИК-МАСТЕР, 2013, с. 103–108.

Dorofeyev, I.V., Syromyatnikov, I.I., 2013. Secular temperature fluctuations in the permafrost soils of Yakutsk. In: The Geography Issues of Yakutsk, issue 11. The impact of climate changes on the natural processes in the cryolithozone. SMIK-MASTER, Yakutsk, pp. 103–108. (in Russian)

Каздым А.А. Культурный слой как один из видов техногенного литогенеза и его литогеохимические особенности // Минералогия техногенеза. Миасс, ИМин. УрО РАН, 2002, с. 226–247.

Kazdym, A.A., 2002. The culture layer as one of the varieties of anthropogenic lithogenesis and its lithogeochemical features. In: Mineralogy of Anthropogenesis. Mineralogy Institute, Ural branch RAS, Miass, pp. 226–247. (in Russian)

Лебеденко Ю.П. О миграции ионов в мерзлых породах // Гляциохимические и криогенные гидрохимические процессы. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1988, с. 57–62.

Lebedenko, Yu.P., 1988. On migration of ions in frozen soils. In: Glaciochemical and Cryogenic Hydrochemical Processes. Far Eastern Science Center AS USSR, pp. 57–62. (in Russian)

Лесман Ю.М. Культурный слой поселений и характер вещевого комплекса // Поселения: среда, культура, социум: Материалы темат. науч. конф. (Санкт-Петербург, 6–9 окт. 1998 г.). СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998, с. 26–33.

Lesman, Yu.M., 1998. The cultural layer of settlements and the character of the substance complex. In: Settlements: the Environment, Culture, and Society. Proceedings of the thematic scientific conference. St. Petersburg, October 6–9, 1998. St. Petersburg University Press, pp. 26–33.

Макаров В.Н. Геохимический атлас Якутска. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 64 с.

Makarov, V.N., 1985. The Geochemical Atlas of Yakutsk. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 64 pp. (in Russian)

Макаров В.Н. Экогеохимия городских озер Якутска / В.Н. Макаров, А.Л. Седельникова. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016, 210 с.

Makarov, V.N., Sedelniova, A.L., 2016. Ecogeochemistry of the City Lakes of Yakutsk. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 210 pp. (in Russian)

Нежданова И.К., Суетин Ю.П., Свешников Г.Б. Об изучении загрязненности городских почв в связи с охраной окружающей среды // Вестн. ЛГУ, 1984, № 12, с. 87–91.

Nezhdanova, I.K., Suetin, Yu.P., Sveshnikov, G.B., 1984. On the study of city soil contamination necessitated by environmental protection. Vestnik LGU, No. 12, 87–91.

- Подъячев Б.П.** Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях Якутского поднятия // Система коренной источник–россыпь. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009, с. 166–173.
Podyachev, B.P., 2009. The geochemical anomalies of noble metals in sedimentary deposits of the Yakutsk elevation. In: The Bedrock-Placer System. Yakutsk Science Center SN RAS, Yakutsk, pp. 166–173. (in Russian)
- Попов Г.А.** История города Якутска. 1632–1917 гг.: Краткие очерки. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2007, т. III, 305 с.
Popov, G.A., 2007. The History of the City of Yakutsk, 1632–1917: Short Stories, vol. III. Yakutsk University Press, Yakutsk, 305 pp. (in Russian)
- Почва, город, экология** / Под ред. Г.В. Добровольского. М., Фонд “За экономическую грамотность”, 1997, 310 с.
Dobrovolsky, G.V. (Ed.), 1997. Soil, City, Ecology. For Economic Literacy Foundation, Moscow, 310 pp. (in Russian)
- Садовникова Л.К.** Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами // Биол. науки, 1989, № 9, с. 47–52.
Sadovnikova, L.K., 1989. Environmental effects of soil contamination with heavy metals. Biologicheskiye Nauki, No. 9, 47–52.
- Салтыков Н.И.** О фундаментах зданий г. Якутска // Тр. Ин-та 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.
Saltykov, N.I., 1946. On building foundations in Yakutsk. Proceedings of V.A. Obrychev Permafrost Institute, vol. 1. Housing and Low-profile Industrial Construction in Permafrost Regions. SA USSR Press, Moscow, Leningrad, pp. 102–136. (in Russian)
- Экология города** / Отв. ред. Н.С. Касимов. М., Науч. мир, 2004, 624 с.
Kasimov, N.S. (Ed.), 2004. City Ecology. Nauchny Mir, Moscow, 624 pp. (in Russian)

Поступила в редакцию
7 мая 2017 г.