

ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА АГРОЛАНДШАФТА

О.Н. Бахмет, член-корреспондент РАН,
А.Н. Солодовников, кандидат биологических наук,
Е.В. Дубина-Чехович, аспирант

Федеральный исследовательский центр Карельский научный центр Российской академии наук,
185035, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
E-mail: d-chehovich@yandex.ru

При оценке экологического состояния сельскохозяйственных угодий вблизи горнодобывающего производства и автомобильной трассы определена среднесуточная пылевая нагрузка и химический состав снежного покрова осушенных земель. Снежные осадки как корректный индикатор аэротехногенных выпадений, формирующиеся в условиях влияния горного карьера, в отличие от воздействия автотранспорта, классифицированы как загрязненные. На фоне очень высокой среднесуточной пылевой нагрузки (от 473,6 до 2101,9 кг/км²) уровень химического загрязнения вблизи карьера остается низким (Zc – 35,5-62,7). Аккумуляция ряда элементов (Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Pb) происходит неравномерно и превышает фоновые показатели в 2-20, а ПДК – в 2-3 раза. Вблизи автотрассы содержание Cr, Al, Mg, Pb, Ca, Co, Ni, Fe в снеге выше фоновых показателей в 2-4 раза, загрязнение распространяется на расстояние более 80 м. В зависимости от вида техногенного влияния установлены различные ряды преимущественного накопления макро- и микроэлементов в снежном покрове: карьер – Al>Mn>Mg>Ca>Fe, автотрасса – Cr>Al>Mg>Pb>Ca>Co. Отмечены разнонаправленные тенденции поступления загрязнителей с поверхностными водами в верхние горизонты почв сельхозугодий в зависимости от физических свойств почв и технических особенностей обустройства мелиоративной сети.

INFLUENCE OF AERIAL TECHNOGENIC POLLUTION ON ELEMENTAL COMPOSITION OF SNOW COVER OF AN AGROLANDSCAPE

Bakhmet O.N., Solodovnikov A.N., Dubina-Chekhovich E.V.

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
185035, Respublika Kareliya, Petrozavodsk, ul. Pushkinskaya
E-mail: d-chehovich@yandex.ru

To estimate the ecological state of agricultural lands near mining company and automobile road a daily dust load and elemental composition of snow cover of meliorated lands was determined. Snow precipitation as a correct indicator of aerial technogenic fallout, forming under influence of a mining company as opposed to influence of motor transport were classified as polluted. Against a very high daily dust load (from 473,6 to 2101,9 kilos per square kilometer) the level of chemical pollution near a mining company is low (Zc – 35,5 – 62,7). Accumulation of some of elements (Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Pb) goes unequally and exceed standard indicators 2-20 times as well as MPC 2-3 times. Close to an automobile road the concentration of Cr, Al, Mg, Pb, Ca, Co, Ni, Fe in snow is 2-4 times higher than standard indicators and extends for more than 80 meters range. Depending on type of technogenic influence different rows of predominant accumulation of macro- and microelements in snow cover were determined: mining company - Al>Mn>Mg>Ca>Fe, automobile road - Cr>Al>Mg>Pb>Ca>Co. Multidirectional trends of intake of pollutants with superficial water into upper horizon of agricultural soils were observed. They depend on physical characteristics of soils and technical properties of arrangement of melioration network.

Ключевые слова: агроландшафт, мелиорация, загрязнение, снежный покров, макро- и микроэлементы, горная компания, автомобильный транспорт, пылевая нагрузка

Key words: agrolandscape, melioration, pollution, snow cover, macro- and microelements, mining company, motor transport, dust load

Одна из основ обеспечения продовольственной безопасности и стабильности сельскохозяйственного производства – мелиорируемые угодья. В результате организационно-экономических преобразований агропромышленного комплекса, увеличения антропогенной нагрузки на фоне отсутствия систематических мероприятий по уходу за мелиоративными системами возникает необходимость в оценке экологического состояния осушенных земель.

В 2018 г. в Карелии из 76890 га в хорошем состоянии (согласно ГОСТ Р 58376-2019) находилось только 16 % (12440 га) земель. Низкая мелиоративная обустроенность, неудовлетворительное культуртехническое состояние и невысокое почвенное плодородие характерно для – 35 % (26960 га) угодий [1, 2]. На фоне постоянных выбросов автомобильного и железнодорожного транспорта, а также в результате интенсификации горнодобывающего и перерабатывающего производства возросла и техногенная нагрузка на осушенные сельскохозяйственные угодья.

Специфику распространения загрязнения по площади агроландшафта определяют, как природно-климатические факторы, так и особенности техногенного воздействия [3]. Масштабы аэротехногенного влияния на сельхозугодья могут быть недооценены, особенно в условиях локального промышленного производства [4, 5]. Организованный сток загрязненных природных вод по системе каналов открытой осушительной сети может охватывать неподверженные воздушному пылевому воздействию территории мелиорированных земель и прилегающие водные объекты.

В антропогенно изменённых экосистемах нарушаются сложившиеся в естественных условиях геохимические потоки макро- и микроэлементов, в биологический круговорот включаются повышенные концентрации различных веществ [6]. В результате аэротехногенного загрязнения изменяются свойства почв агроценозов, кислотность, состав почвенного поглощающего комплекса, водно-воздушный режим. Это влечет за собой снижение устойчивости почв к загрязнению [7], по-

вреждение сельскохозяйственных растений, и, следовательно, снижение их урожайности.

Один из эффективных и экономичных способов сбора данных о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы в почву и природные воды [8] – исследование химического состава снежного покрова. В Карелии, относящейся к зоне избыточного увлажнения, за холодный период (ноябрь – апрель) выпадает 150-350 мм осадков. Нужно отметить, что в условиях климатических преобразований за последние десятилетия отмечена положительная динамика изменения основных характеристик режима выпадения атмосферных осадков (жидких, твердых, смешанных). Средние за 1991–2013 гг. годовые суммы превышают климатические нормы (550-750 мм [9]) на 20-70 мм, происходит увеличение интенсивности осадков во все сезоны года [10].

Снежный покров в регионе сохраняется в течение продолжительного времени. В таких климатических условиях он становится корректным индикатором аэротехногенных выпадений в зимний период.

Снег обладает высокой сорбционной способностью. Он фактически аккумулирует и сохраняет в себе все загрязняющие атмосферу компоненты. Химический состав талого снега формируется в результате поступления с осадками различных минеральных элементов, поглощения газов, водорастворимых аэрозолей и твердых пылевых частиц, оседающих из атмосферы [8, 11].

Цель исследований – оценка уровня загрязнения мелиорированного агроландшафта в зоне аэротехногенного воздействия (автомобильного транспорта и горнодобывающего карьера) путем определения пылевой нагрузки и изучения химического состава снежного покрова.

Методика. Работу проводили в 2018–2019 гг. на мелиорированных сельскохозяйственных угодьях вблизи горнодобывающего карьера (61°51'54"с.ш., 33°52'12"в.д.) и автомобильной дороги (61°83'24"с.ш., 34°20'53"в.д.). Фоновая пробная площадь находилась вдали от техногенного воздействия, но, как и площади с антропогенным влиянием, расположена в южной агроклиматической зоне Карелии [12].

Влияние *горнодобывающего производства* на сельскохозяйственные угодья, осушенные открытой сетью

каналов (протяженность 55 км), оценивали на объекте, примыкающем к месторождению габбро-диабазов. Карьер разрабатывается с 2008 г. и занимает площадь 200 га. В нем расположены открытые участки дробления и отсева на фракции; ведутся погрузочно-разгрузочные работы. Производственный комплекс не оборудован средствами пылеподавления, что определяет высокую запыленность территории карьера и прилегающих осушенных земель. Почвенный покров сельскохозяйственных угодий вокруг карьера представлен среднемоющими торфяно-перегнойными низинными болотными почвами.

Образцы снежного покрова для проведения исследований отбирали по окончании снегостава с учетом преобладающих ветров по градиенту 100, 200, 300, 400 и 500 м от горнодобывающего карьера.

Изучение влияния *автомобильного транспорта* на сельскохозяйственные угодья (протяженность открытой сети каналов 86 км), проводили на мелиоративном объекте, примыкающем к федеральной трассе Р-21. Поступление аэротехногенной пыли не преграждалось древесно-кустарниковой растительностью. Образцы снега отбирали по градиенту 20, 30, 40, 60, 80 и 100 м от автомобильной дороги. Почвенный покров сельскохозяйственных угодий представлен дерново-подзолистыми глееватыми супесчаными почвами.

Пробоотбор снежной массы проводили в трехкратной повторности в соответствии с РД 52.04.186-89. Продолжительность снегостава в зимний период 2018–2019 гг. для всех объектов исследования составила 141 день.

При изучении снежного покрова определяли среднесуточную пылевую нагрузку на сельскохозяйственные угодья, а также концентрацию макро- и микроэлементов в талой снежной массе. В отфильтрованной талой воде измеряли реакцию среды и содержание следующих элементов – Ni, Zn, Co, Cu, Cr, Pb, Mn, Fe, Ca, Mg (на атомно-абсорбционных спектрофотометрах AA-6800 и AA-7000, Shimadzu, Япония). Полученные показатели соотносили с фоновым содержанием химических веществ в атмосферных осадках, отобранных вдали от техногенного влияния, и ПДК. Кроме того, был проведен расчет коэффициента концентрации (Кк) и суммарной концентрации (Zc) химических веществ в снежном покрове.

Табл. 1. Химический состав снежного покрова сельскохозяйственных угодий вблизи горнодобывающего карьера, мкг/л

Элемент	Расстояние от источника загрязнения, м					Фон	ПДК
	100	200	300	400	500		
Ca	7670,0 ± 707,6*	7955,7 ± 997,2*	6336,3 ± 362,0*	6541,4 ± 1665,1*	3518,2 ± 413,7*	883,3	н. д.**
Mg	1391,8 ± 32,9*	1338,0 ± 192,3*	1500,4 ± 431,2*	1422,9 ± 533,9*	666,9 ± 114,9*	154,6	н. д.
Al	88,5 ± 20,0*	64,9 ± 19,4*	80,0 ± 21,1*	27,7 ± 16,6	83,2 ± 35,3*	4,1	40
Fe	197,6 ± 107,3	149,8 ± 58,1*	236,9 ± 22,7*	50,9 ± 25,0	263,9 ± 112,4*	25,8	100
Mn	21,4 ± 9,1	16,1 ± 7,6	22,4 ± 5,0*	15,4 ± 4,04	19,1 ± 7,6	9,0	10
Zn	3,3 ± 1,9	2,1 ± 1,8	4,7 ± 1,0	2,8 ± 0,4	3,2 ± 1,8	5,2	10
Co	0,5 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,2	0,6 ± 0,2	0,7 ± 0,1	0,5	10
Ni	0,6 ± 0,5	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,04	0,7 ± 0,4	1,0 ± 0,3	0,8	10
Cu	1,1 ± 1,3	0,3 ± 0,4	0,4 ± 0,2	0,9 ± 0,04	0,6 ± 0,3	0,7	1
Cr	0,2 ± 0,2	0,2 ± 0,04	0,2 ± 0,2	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3	20
Pb	1,0 ± 1,1	0,5 ± 0,2	0,5 ± 0,5	0,4 ± 0,5	0,2 ± 0,1*	0,5	100

± – (здесь и далее) стандартное отклонение; *(здесь и далее) достоверно значимые различия (p<0,05), по отношению к фоновым значениям; **(здесь и далее) н.д. – нет данных

Табл. 2. Загрязнение снега на мелиорированных агроландшафтах вблизи горнодобывающего карьера и автомобильной трассы

Расстояние от источника загрязнения, м	Пылевое загрязнение		Химическое загрязнение			
	выпадение пыли, кг/км ²	уровень среднесуточной пылевой нагрузки [13]	Zc	ряды накопления элементов ¹	уровень загрязнения [13]	
Горный карьер	100	2101,9 ± 69,2*	очень высокий	62,7	низкий	
	200	1787,4 ± 39,5*	очень высокий	49,8	низкий	
	300	1187,1 ± 123,6*	очень высокий	63,0	Al>Mn> Mg>Ca>Fe	низкий
	400	634,8 ± 69,7*	высокий	35,5		низкий
	500	473,6 ± 63,1*	высокий	52,8		низкий
Автомобильная трасса	20	59,2 ± 11,0*	значения не достигают критических показателей	24,6	значения не достигают критических показателей	
	30	21,4 ± 10,9*		15,8		
	40	21,1 ± 9,5*		17,3		
	60	12,3 ± 5,4*		13,1		
	80	7,3 ± 4,2		13,6		
	100	6,5 ± 1,7	18,0			

¹загрязнители, коэффициент концентрации которых больше 2

Результаты и обсуждение. Твердый осадок снежного покрова во всех пробах состоял из природных частиц (фрагментов растительных органов кормовых трав, листьев березы, а также хвои и коры деревьев), удаленных при пробоподготовке, образцы снега на загрязненных участках содержали еще мелкодисперсную пыль темно-серого цвета.

Средняя кислотность талой снеговой массы возле карьера составляла 7,1-7,5 ед. рН, рядом с автомобильной дорогой – 6,6-7,7 ед. рН. Это указывает на процесс подщелачивания и нетипично для атмосферных осадков (снега) в целом по Карелии (среднее значение – 5,9) [8].

По данным лабораторного анализа накопление химических элементов в пробах снега под влиянием *горнодобывающего карьера* превосходит неравномерно по градиенту удаленности и превышает как фоновые показатели в 2-20 раз (Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Pb), так и ПДК (Al, Fe, Mn) – в 2-3 раза. Содержание Cu, Co, Ni, Cr, Zn сопоставимо с критическими значениями (ПДК, фон) или меньше их (табл. 1).

Коэффициенты суммарной концентрации (Zc) загрязнения снежных осадков поллютантами варьируют (табл. 2), но на всех пробных площадях отмечен низкий уровень общего химического загрязнения.

Анализ закономерностей изменения пылевой нагрузки свидетельствует о постепенном ее снижении от границ карьера до 500 м, однако все показатели соответствуют очень высокому и высокому уровням загрязнения (см. табл. 2, рис 1а). Изменение содержания макро- и микроэлементов в снеговом покрове не имело такой же направленности.

Важно отметить, что особенности аккумуляции поллютантов в снежном покрове вблизи горного карьера отличались от их накопления в верхнем горизонте почвы на пробных площадях (рис. 2а), что обусловлено физическими свойствами торфяных почв и техническими параметрами осушительной сети: высокое влагонасыщение в осенний период и, соответственно, более позднее оттаивание, по сравнению с минеральными почвами, в весенний период [14]. Частая сеть открытых каналов (через каждый 30 м), а также выпуклая профилировка торфяных карт способствуют миграции загрязненных талых снежных вод не вниз по почвенному профилю, а в каналы осушительной сети.

Немалую роль в распространении загрязнения в этом агроландшафте играет микрорельеф территории (в первую очередь особенности зарастания кустарниковой и древесной растительностью открытых каналов). Специфика технологического процесса горнодобывающего и перерабатывающего производства также связана с образованием и дальнейшей седиментацией на разном удалении от источника загрязнения неоднородных по свойствам, химическому и дисперсному со-

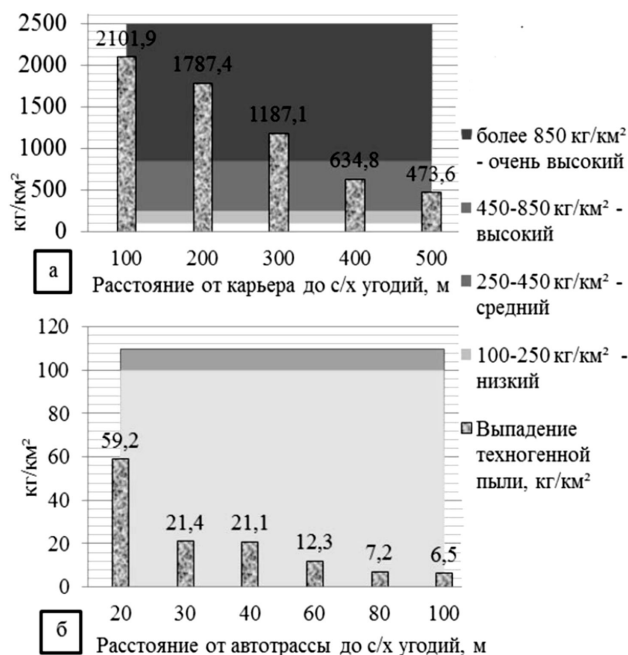


Рис. 1. Уровни пылевого загрязнения и пылевая нагрузка на осушенные сельскохозяйственные угодья вблизи горнодобывающего карьера (а) и автотрассы (б), кг/км².

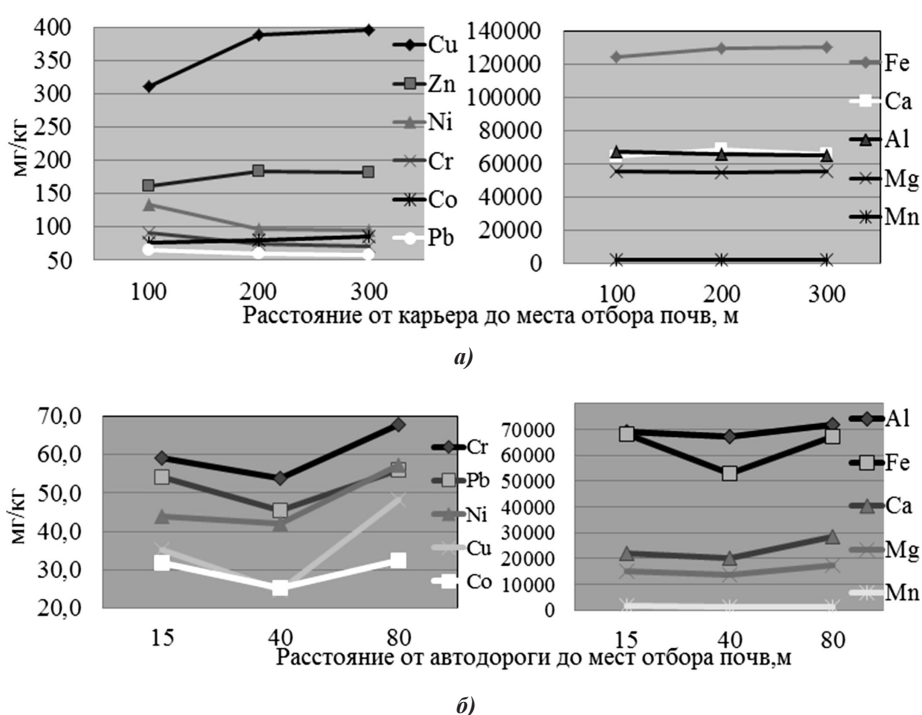


Рис. 2. Динамика накопления макро- и микроэлементов в верхнем горизонте (Ad) почв сельскохозяйственных угодий, мг/кг: а) вблизи горнодобывающего карьера; б) прилегающих к автодороге.

ставу пылевых частиц в результате дробления горной породы на фракции разного размера.

В отличие от плавного снижения пылевой нагрузки, накопление химических элементов в снегу по мере удаления от автомобильной дороги сначала постепенно снижается, а на расстоянии 100 м от трассы вновь возрастает, что, вероятно, связано с распространением загрязнения в виде аэрозолей.

Показатели пылевого и химического загрязнения рядом с этим объектом не достигают критических значений (см. табл. 2, рис. 1б). Однако по результатам химического анализа содержание Cr, Al, Mg, Pb, Ca, Co, Ni, Fe в снегу превышает фоновые показатели в 2-4 раза, накопление Zn, Mn, Cu приближено к фоновому уровню (табл. 2б).

По мере удаления от автодороги (до 40 м) отмечается снижение содержания поллютантов в почвах, что коррелирует с уменьшением пылевой и химической нагрузки в целом. Однако на расстоянии 60-100 м от дорожного полотна, концентрация загрязнителей вновь возрастает (рис. 3).

Результаты нашего исследования снежного покрова вблизи автодорог согласуются с литературными данными [7, 15, 16] по изучению аккумуляции загрязнителей в снегу и почвах сельскохозяйственных угодий. Основная часть загрязнителей оседает в почвах придорожной территории до 20 м от автотрассы, но вследствие высокой дисперсности частиц поллютанты разносятся на большие расстояния от дорожного полотна.

Табл. 3. Химический состав снежного покрова придорожной полосы сельскохозяйственных угодий, мкг/л

Элемент	Расстояние от источника загрязнения, м						Фон	ПДК
	20	30	40	60	80	100		
Ca	2 898,8* ± 626,3	619,9 ± 222,8	1 292,6 ± 640,5	1 212,1 ± 273,1	1 085,0 ± 364,8	1 482,2 ± 456,3	883,3	н. д.**
Mg	583,5* ± 291,7	227,4 ± 67,9	335,3 ± 125,3	256,4 ± 229,3	178,6 ± 155,0	363,2 ± 246,8	154,6	н. д.
Al	6,7 ± 9,8	4,3 ± 2,5	4,2 ± 1,6	5,7 ± 2,7	4,7 ± 0,8	18,6 ± 1,2	4,1	40,0
Fe	15,3 ± 3,1	32,9 ± 29,7	49,0 ± 7,2	40,9 ± 24,0	54,9 ± 4,3	23,0 ± 3,3	25,8	100,0
Mn	10,5 ± 4,1	11,7 ± 1,5	6,3 ± 4,4	11,8 ± 2,1	9,0 ± 3,9	12,0 ± 2,6	9,0	10,0
Zn	3,6 ± 1,8	4,0 ± 2,7	3,8 ± 2,8	4,7 ± 1,0	6,6 ± 0,6	7,0 ± 1,1	5,2	10,0
Co	0,4 ± 0,3*	0,7 ± 0,4	1,0 ± 0,4	1,2 ± 0,4*	1,0 ± 0,2	1,1 ± 0,1*	0,5	10,0
Ni	0,2 ± 0,6	0,5 ± 0,7	0,8 ± 0,1	0,4 ± 0,2	1,7 ± 0,2	2,0 ± 0,1	0,8	10,0
Cu	0,1 ± 0,5	0,1 ± 1,4	< 0,1	< 0,1	1,5 ± 0,04	0,4 ± 0,03	0,7	1,0
Cr	0,7 ± 0,5	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,4*	0,9 ± 0,2*	0,6 ± 0,2	1,2 ± 0,3*	0,3	20,0
Pb	1,1 ± 0,2*	0,5 ± 0,8	1,7 ± 0,2*	0,6 ± 0,2	1,5 ± 0,3	0,8 ± 0,03	0,5	100,0

Таким образом, снежные осадки, формирующиеся в условиях влияния горного карьера, в отличие от воздействия автотранспорта, классифицированы как загрязненные. На фоне очень высокой среднесуточной пылевой нагрузки уровень химического загрязнения вблизи карьера остается низким. Аккумуляция поллютантов происходит неравномерно и превышает фоновые показатели в 2-20 раз, ПДК – в 2-3 раза. Вблизи автотрассы содержание загрязнителей в снеге выше фоновых показателей в 2-4 раза и распространяется на расстояние больше 80 м.

В зависимости от вида техногенного влияния установлены различные ряды преимущественного накопления макро- и микроэлементов в снежном покрове. Отмечены разнонаправленные тенденции поступления поллютантов с поверхностными водами в верхние горизонты почв сельхозугодий в зависимости от физических свойств почв и технических особенностей обустройства мелиоративной сети. Для прекращения дальнейшего загрязнения и сохранения особо ценных мелиорированных сельскохозяйственных угодий рекомендуется обустройство лесозащитных полос вдоль автомобильных трасс и пылеуловительных устройств вблизи горнодобывающих предприятий.

Литература.

1. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2018 г. / ред А. Н. Громцев, О. Л. Кузнецов, Г. Т. Шкиперова. Петрозаводск: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия, 2019. 314 с.
2. Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга». Показатели по оценке и учету мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем. URL: <https://inform-raduga.ru/fgbu/87?report=orvalu&cur=98269> (дата обращения: 15.07.2020).
3. Soil sedimentation and quality within the roadside ditches of an agricultural watershed / M. T. Streeter, K. E. Schilling, M. St. Clair, et al. // *Science of The Total Environment*, Vol. 657. P. 1432–1440, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.113
4. Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Вишневецкая И.А. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244. doi:10.31857/S0321-0596462232-244
5. Коронкевич Н. И., Долгов С. В. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 4. С.103–110. doi:10.23968/2305–3488.2017.22.4.103–110
6. Овчинникова М. Ф. Особенности трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы, нарушенной строительством трассы магистрального трубопровода // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2019. № 1. С. 35–41.
7. Рудь А.В. Загрязнение тяжелыми металлами почв и растительности придорожных полос автодорог Ленинградской области // *Вестник БГУ. Сер. 2*. 2007. № 1. С. 111–115
8. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья / Л.Г. Богатырев, Н.И. Жилин, В.П. Самсонова и др. // *Вестник московского университета. Серия 5. География*. 2018. № 2, с. 85–96
9. Романов А. А. О климате Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1961. 139 с.
10. Назарова Л.Е. Атмосферные осадки в Карелии // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 9. С. 114–120, DOI: 10.17076/lit56
11. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман М.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 181 с.
12. Атлас Карельской АССР: учебно-справочное картографическое пособие / ред. А. Н. Трофимов и др. Л.: Ленингр. гос. ун-т, 1989. 40 с.
13. Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 319 с.
14. Инишева Л.И., Махлаев В.К. Режимы пойменных торфяников (справочное пособие). Томск: ЦНТИ, 2001. 86 с.
15. Ашиккалиев А. Х., Вильданова Л. Р., Ашиккалиева М. А. Почвенно-экологическая оценка земель сельскохозяйственного назначения степной зоны // *Естественные и технические науки*. 2017. № 12. С. 271–274.
16. Traffic-related trace elements in soils along six highway segments on the Tibetan Plateau: Influence factors and spatial variation / G. Wang, C. Zeng, F. Zhang et al. // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 581–582. P. 811–821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.018>

Поступила в редакцию 19.10.2020
После доработки 20.12.2020
Принята к публикации 24.02.2021