

УДК 631.43:631.459 631.459.21  
DOI 10.18101/2587-7148-2019-2-57-70

**ОПУСТЫНИВАНИЕ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ  
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ г. ЗАКАМЕНСКА РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ)**

**А. И. Куликов, Н. Н. Хаптухаева, Н. Б. Бадмаев**

© **Куликов Анатолий Иннокентьевич**

доктор биологических наук, профессор  
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.  
E-mail: kul-an52@mail.ru

© **Хаптухаева Нона Николаевна**

кандидат биол. наук, научный сотрудник  
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.  
E-mail: nonakhapt@mail.ru.

© **Бадмаев Нимажап Баяржапович.**

доктор биологических наук, профессор  
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.  
E-mail: nima\_b@mail.ru.

Рассматриваются экологические проблемы урбанизированных территорий на примере г. Закаменска Республики Бурятия. Урбоопустынивание связано с химическим загрязнением песчаного техноэлювия, распространением поллютантов водными и ветровыми потоками по широкому периметру. Определены показатели нагрузок на исследуемую территорию. Для расчета эрозии техноэлювия с поллютантами применено универсальное уравнение USLE, а дефляционное загрязнение рассчитывалось, исходя из известного положения, что кинетическая энергия ветра прямо пропорциональна кубу его скорости и обратно пропорциональна квадрату влажности почв. Получены количественные параметры загрязнения урбоземов Закаменска такими приоритетными металлами как Cd, Pb, Zn, Cu, а также Mo и W. Получено, что эрозионные потери загрязненных песков колеблются от 6,7 до 28,8 т/га/год, а дефляционные потери достигают 10 т/га/год. При этом в урбоэкосистему только с водными потоками, только ртути и только с 1996 г. (время закрытия комбината) попало примерно 155 т. При учете дефляционного загрязнения эта величина возрастет не менее, в 2 раза.

**Ключевые слова:** урбоэкосистемы; техноэлювий; урбоопустынивание; экологическая устойчивость; эрозия; дефляция; эрозионное загрязнение; параметры загрязнения; эрозионные потери; оврагообразование; тяжелые металлы.

**Для цитирования:**

*Куликов А. И., Хаптухаева Н. Н., Бадмаев Н. Б.* Опустынивание и загрязнение тяжелыми металлами урбанизированных территорий (на примере г. Закаменск Республики Бурятия) // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2019. № 2. С.57–70.

### Введение

Для индустриального и постиндустриального общества характерным является урбанизация. В городах создается особая среда, формируются своеобразные урбозкосистемы и почвы — урбоземы (Прокофьева, 1998, Бармин, Синцов, 2011). Высокая концентрация населения и техники, пониженная экологическая устойчивость урбоземов вызвала широкое развитие процессов опустынивания.

Экологические проблемы Закаменска связаны с песчаными отложениями (техноэлювием) — последствиями горнодобывающей деятельности. Пески накоплены в большом количестве и содержат опасные концентрации тяжелых металлов. Опустынивание на урбанизированной территории (урбоопустынивание) проявляется локально, но отличается от сельскохозяйственного глубоким и всесторонним деструктивным изменением компонентов среды. В Закаменске урбоопустынивание связано с химическим загрязнением песчаного техноэлювия, распространением поллютантов водными и ветровыми потоками. Эрозия происходит как в виде плоскостного смыва (рис. 1), так и линейного размыва (рис. 2). Наиболее впечатляющим является овражная эрозия.



Рис. 1. Плоскостная эрозия поверхности техноэлювия.

В России овражной эрозией поражено до 7 млн. га земель, количество оврагов приближается к 15 млн. шт., ежегодный прирост в длину овражной сети составляет более 20 тыс. км. Более 700 городов России подвержено овражной эрозии

Куликов А. И., Хантухаева Н. Н., Бадмаев Н. Б. Опустынивание и загрязнение тяжелыми металлами урбанизированных территорий (на примере г. Закаменск Республики Бурятия)

(Осинцева, 2001, Ковалёв, 2004). Причем оврагообразование на городской территории нельзя считать однозначно опасным. Возникает взаимозависимая система город-овражно-балочная система.



Рис. 2. Овражная эрозия поверхности техноэлювия

Техноэлювий Закаменска относится к рыхлым или слабосвязным пескам (табл. 1). Плотность песков значительна, поэтому общая порозность невелика, как и коэффициент порозности. Для эрозии важно, что пески характеризуются большой фильтрацией влаги.

Таблица 1

Некоторые физические свойства песков техноэлювия г. Закаменска

Название	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Порозность, % объемный	Кф, см/сут.	$e$
Песок рыхлый	2,5	1,67	33	140	0,50
Песок связный	2,5	1,60	36	120	0,56

Среди гранулометрических фракций преобладают частицы крупнее 0,2 мм (табл. 2). Тонкие фракции содержатся в количестве около 12%. По происхождению и гранулометрическому составу (ГОСТ 25100-95) отложения техноэлювия относятся к классу техногенных дисперсных грунтов, группе несвязных, подгруппе

природных насыпных перемещенных образований, типу отходов производственной и хозяйственной деятельности, виду песков.

$\rho_s$  — плотность твердой фазы,  $\rho_d$  — плотность почвы, Кф — коэффициент фильтрации,  $e$  — коэффициент пористости, т.е. отношение объема пор к объему твердой фазы, формула для определения  $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$ .

Так как содержание фракций крупнее 0,25 мм превышает 50 %, то пески техноэлювия имеют среднюю крупность. По данному показателю пески техноэлювия аналогичны природным эоловым пескам (Иванов, 1971).

Таблица 2

Гранулометрический состав техноэлювия

Размер фракций, мм	Содержание, %
1–0,5	36,98
0,5–0,2	39,28
0,2–0,074	12,06
0,074–0,044	5,3
<0,044	6,38
ИТОГО:	100

В общем виде эрозия начинается, если соблюдается условие

$$r_o > q, \quad (1)$$

где  $r_o$  — скорость выпадения дождевых осадков,  $q$  — скорость впитывания воды поверхностью техноэлювия. Расход стока воды ( $Q$ ) на различных участках склона ( $x$ ) определяется зависимостью

$$dQ/dx = r_o - q \quad (2)$$

т. е. зависит от потерь стока по мере продвижения вниз по склону на впитывание, а эрозионные потери почвы ( $V$ ) будут зависеть от  $w$  — площади поперечного сечения стока (живое сечение) и  $l$  — длины стока

$$V = \int_0^l w dl \quad (3)$$

Сдвигающая сила водного потока ( $F_{cd}$ ) зависит от скорости потока ( $v$ ), слоя воды ( $h$ ) и отношения массы частицы ( $m$ ) к площади ее поперечного сечения ( $S$ ):

$$F_{cd} = f(F_{cu}, v, h, m/S) \quad (4)$$

Величина  $F_{cd}$  возрастает с увеличением ( $v$ ) и ( $h$ ) и уменьшением ( $m/S$ ).

$F_{cu}$  — сила сцепления почвенных частиц, находится в функции от плотности частицы ( $\rho$ ) и прочности ее связи с другими частицами  $F_{cv}$ , зависит от содержания в почве коллоидов и многих других факторов:

$$F_{cv} = f(\rho, F_{cv}) \quad (5)$$

Эрозия происходит при условии  $F_{cd} > F_{cu}$ . Скорость водного потока, при которой начинается отрыв твердых частиц от поверхности почвы, называется критической скоростью потока ( $v_{кр}$ ). При одной и той же плотности суммарное по-

перечное сечение частиц на единицу объема возрастает по мере уменьшения их размеров. Поэтому критическая скорость потока меньше на почвах с более мелкими микроагрегатами и гранулометрическими частицами, чем на почвах с крупными частицами.

Для прогнозного расчета эрозии техногенных песков Закаменска воспользуемся, так называемым, «универсальным уравнением» эрозионных потерь почвы (модель USLE), разработанным в США (Wishmeier, Smith, 1978). Модель USLE адаптирована для условий России в ряде работ (Кузнецов, Глазунов, 2004, Ларионов, 1993). Уравнение имеет вид:

$$Q = 0,224 \cdot R_{30} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P, \quad (6)$$

где  $Q$  — потери почвы при эрозии,  $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$ ,  $R_{30}$  — эрозионный потенциал (индекс) дождей,  $K$  — комплексная характеристика свойств почвы (эродируемость или смываемость почвы),  $LS$  — эрозионный потенциал (индекс) рельефа,  $C$  — комплексная характеристика способа использования почвы,  $P$  — комплексная характеристика противоэрозионных мероприятий. Для нашего случая последние два члена приравниваются единице, т. к. техноэлювий в земледелии не используется.

Универсальное уравнения почвенной эрозии позволяет определять смыв почвы со склонов в широком диапазоне временных масштабов от одного эрозионного события до всего периода освоения. Недостатком является невозможность определения величины аккумуляции и неучет переотложения наносов в пределах склонов.

Эрозионный потенциал осадков равен:

$$R_{30} = E \cdot I_{30} / 100, \quad (7)$$

где  $I_{30}$  — 30-минутная интенсивность дождя,  $\text{мм}/\text{ч}$ ,  $E$  — кинетическая энергия капель для 1 мм дождя, выпадающего на  $1 \text{ м}^2$ ,  $\text{кгс} \cdot \text{м}$ . Энергия дождя определяется по формуле:

$$E = 1,213 + 0,8901 \cdot \lg r_d, \quad (8)$$

$r_d$  — интенсивность дождя,  $\text{мм}/\text{ч}$ .

Определить послойно кинетическую энергию дождя и в целом эрозионный потенциал осадков довольно сложно. Причем подходы и расчетные схемы должны быть унифицированными, чтобы можно было проводить сравнительный анализ. Ниже эрозионный потенциал дождя ( $R_{30}$ ) определен по произведению слоя осадков на максимальную 30-минутную интенсивность

$$R_{30} = 0,258 \cdot H \cdot I_{30} - 0,149, \quad (11)$$

где  $H$  — слой осадков,  $\text{мм}$ .

Индекс  $I_{30}$  рассчитывается по следующей формуле

$$I_{30} = 0,121 \cdot \exp(0,0529 \cdot H), \quad (12)$$

Расчеты проводятся отдельно для каждого дождя слоем 10 мм и более. Дожди в меньшем количестве не вызывают заметного смыва (Толчельников, 1990). Далее следует суммирование  $R_{30}$  отдельных дождей за сезон с жидкими осадками.

В Закаменске для одного дождя ( $i$ ) слоем  $H_i = 14,1 \text{ мм}$  получено

$$I_{30} = 0,121 \cdot \exp(0,0529 \cdot 14,1) = 0,121 \cdot \exp(0,7176) = 0,121 \cdot 2,142043 = 0,259187$$

Отсюда эрозионный индекс единичного дождя

$R_{i30} = 0,258 \cdot 14,1 \cdot 0,259187 - 0,149 = 0,79$ . Для всех дождей расчетного года  $\sum R_{30i} = 8$ . Для получения климатической нормы используют осреднения обычно за 30 лет (в США 22 года). По Закаменску среднее значение  $R_{30}$  за 1966–2013 гг. равняется 21,4 ед. По схематической карте эрозионного потенциала осадков (Ларионов, 1993) район Закаменска расположен между значениями 6 и 10 ед.

На распределение осадков в многолетнем цикле оказывают влияние глобальные изменения климата. В Закаменске изменения ЭПО в 1966–1975 гг. колеблются в пределах 9–37 при среднем значении 18,0 ед. В следующем десятилетии (1976–1985 гг.) диапазон колебаний расширился до 10–42 при средней величине 16,7 ед. В 1986–1995 гг. происходит дальнейшее расширение экстремума до 6–111 при среднем ЭПО 23,6 ед. Максимум ЭПО 111 ед. наблюдался в 1992 г. Если исключить аномальный год, то получим колебания в пределах 6–28 и среднее 13,9 ед. В следующем десятилетии (1996–2005 гг.) происходит дальнейший рост среднего значения ЭПО до 26 ед. при крайних величинах 3,5–42. В 2006–2013 гг. амплитуда колебания ЭПО продолжала возрастать от 3 до 61, а среднее значение достигло 25,5 ед. Особенно неустойчивыми выглядят последние десятилетия XXI в. Из уравнения регрессии следует, что рост ЭПО составляет 2,5 ед/10 лет (рис. 3).

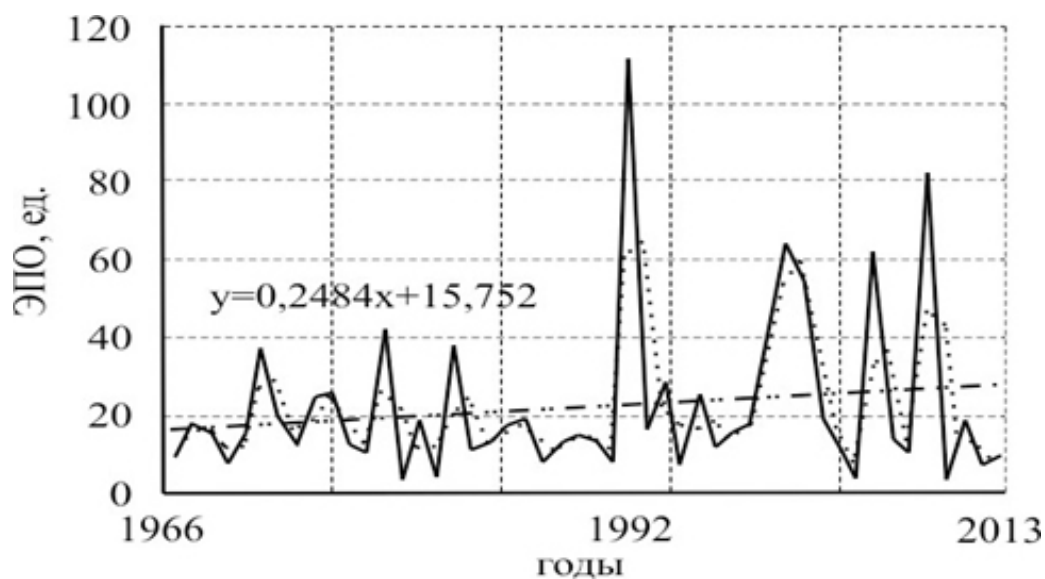


Рис. 3. Многолетняя динамика эрозионного потенциала.

Общий рост ЭПО и особенно его неустойчивости по годам свидетельствует о том, что все более вероятными становятся эрозионноопасные дождевые ливни.

LS-фактор для конкретного склона показывает, во сколько раз интенсивность смыва на данном склоне при его морфометрических характеристиках превышает интенсивность смыва на единицу индекса осадков со стоковой площадки с эталонными параметрами длины и уклона. Для вычисления эрозионного потенциала рельефа LS надо иметь фактические значения крутизны склона и длины склона. За длину склона обычно принимают длину линии стока какого-либо одного типа угоды от его верхней границы, водораздела или искусственного рубежа стока

(профилированная дорога, канава, лесная полоса и т. д.) до нижней границы или тальвега лощины (балки), или также искусственного рубежа стока. Уклон измеряется по наиболее крутой части склона между двумя соседними или несколькими сближенными горизонталями.

Участки эрозионного загрязнения расположены в восточной части города. Первый участок техноэлювия занимает площадь 30,43 га, относительная высота 37 м, длина линии стока 480 м, средняя крутизна склона в сторону водотока и городской черты  $9,5^\circ$  ( $\text{tg } 9,5^\circ = 16,7\%$ ). Второй участок имеет площадь 170,4 га, высоту 86 м, длину 920 м, среднюю крутизну склона в сторону дренирующего водотока  $21^\circ$  ( $\text{tg } 21 = 38,4\%$ ). В виду искусственного происхождения и относительно небольшого (в геологическом масштабе) времени после отсыпки склоны участков в продольном профиле ровные, в поперечном изрезаны эрозионными рытвинами, бороздами и оврагами.

Для определения эрозионного потенциала рельефа воспользуемся выражением

$$LS = L^{0,4} \times S^{1,45}. \quad (13)$$

Для первого участка  $LS_1 = L^{0,4} \times S^{1,45} = 480^{0,4} \cdot 16,4^{1,45} = 11,817 \cdot 0,075 = 0,89$ .

Для второго участка  $LS = L^{0,4} \times S^{1,45} = 920^{0,4} \cdot 38,4^{1,45} = 15,389 \cdot 0,250 = 3,83$ .

Для приближенного быстрого определения LS заслуживает внимания номограмма (рис. 4).

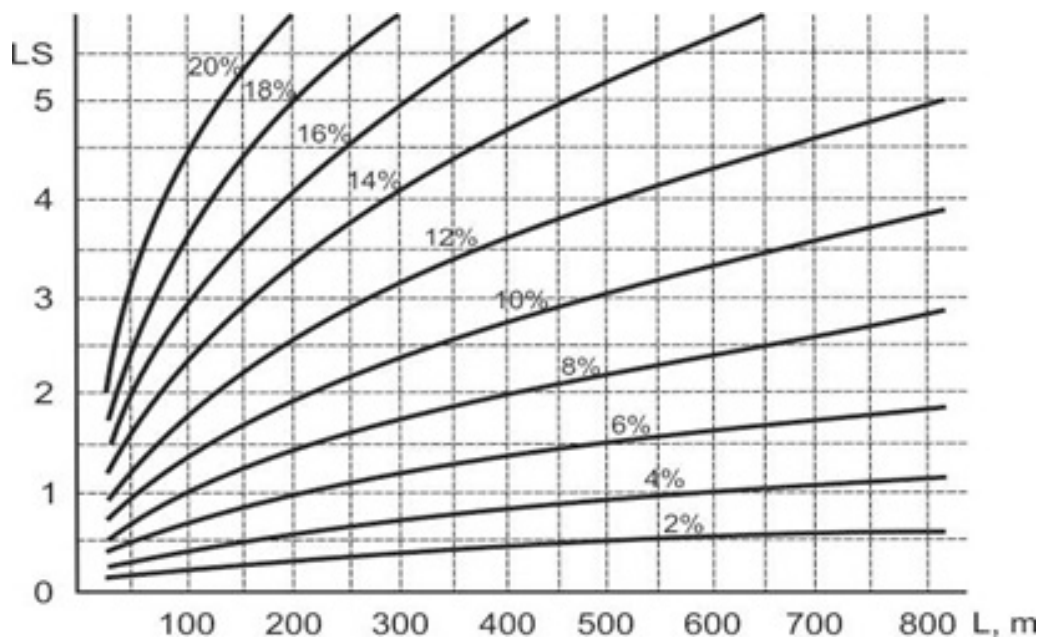


Рис. 4. рис.4.Номограмма для определения эрозионного потенциала рельефа LS

Из табулированных значений (Кузнецов, Глазунов, 2004) вытекает, что противозрозионную стойкость оголенного песчаного техноэлювия можно принять равной  $K = 0,42$ .

С учетом полученных параметров эрозионные потери техногенных песков составят на первом участке:



$$Q_1 = 0,224 \cdot R \cdot K \cdot LS_1 = 0,224 \times 8 \times 0,42 \times 0,89 = 0,6698 \text{ кг/м}^2/\text{год} = 6,7 \text{ т/га/год}.$$

Тогда со всей площади первого участка в черту города ежегодно попадает до 204 т загрязненных песков.

На втором участке:

$$Q_2 = 0,224 \cdot R \cdot K \cdot LS_2 = 0,224 \times 8 \times 0,42 \times 3,83 = 2,8826 \text{ кг/м}^2/\text{год} = 28,8 \text{ т/га/год}.$$

т. е. прессинг загрязнения на гидрозкосистемы местного водотока составляет 4907 т ежегодно.

Почвенно-эрозионное загрязнение среды — самостоятельное явление. Для него характерны свои особые почвенно-эрозионные миграционные трассы загрязнителей на водосборе. Транспорт вещества происходит со склоновыми наносами. Последние вдоль склона проходят гидромеханическую селекцию по фракциям и специфическую химическую трансформацию.

В районе оз. Байкал при интенсивности смыва почвы на пашне 15,8 т/га/год, модуле смыва 3,2 т/га/год и годовом слое водного стока 43 мм условная концентрация валового фосфора составила 6,0 мг/л (Литвин, Кирюхина, 2004). Интересны сведения, приведенные М. Ю. Белоцерковским, М. В. Топуновым (Белоцерковский, Топунов, 1996). Так, в 90-х годах XX в. в Бурятии при общей площади пашни 1019,2 тыс. га средний смыв составлял 10,5 т/га/год, а допустимый 4,5 т/га/год. Вообще в Восточно-Сибирском регионе интенсивность смыва почвы с пашни одна из самых высоких среди экономических регионов России — 8,1 т/га/год. В целом по России интенсивность смыва составляет 4,3 т/га/год. Ежегодный валовый смыв с территории Восточной Сибири равен 77926,1 тыс. т., а с территории России — 566 240,2 тыс. т. Н. И. Хирсановым и Г. К. Осиповым (цит. по: <http://makkaveev-lab.narod.ru/SEFP18-2.pdf>) разработана эмпирическая формула поступления фосфора в природную среду с продуктами эрозии  $W_p = 0,02 G^{0,58}$ , где  $G$  — модуль смыва почвы (т/га), а  $W_p$  — вынос фосфора (кг). Показатель степени в этой зависимости отражает относительное снижение интенсивности выноса фосфора с ростом интенсивности смыва почв. Фосфор принят индикаторным элементом.

Для техногенных песков Закаменска приоритетными загрязнителями являются Cd, Pb, Zn, Cu, а также Mo и W. Для этих элементов рассчитаны размеры эрозионного загрязнения городской территории и водных объектов (табл. 3).

Таблица 3

Эрозионное загрязнение территории Закаменска тяжелыми металлами

Элемент-загрязнитель	Содержание	1-й участок	2-й участок
Cd	a) insituv песках техноэлювия, %	0,001	0,001
	b) в эродированных песках, т/т	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	c) валовой прессинг со всей площади участка на урбозкосистему, т/год	$2,04 \cdot 10^{-3}$	0,049
	d) прессинг за период 1996–2011 гг., т	0,030	0,700



Куликов А. И., Хантухаева Н. Н., Бадмаев Н. Б. Опустынивание и загрязнение тяжелыми металлами урбанизированных территорий (на примере г. Закаменск Республики Бурятия)

<b>Pb</b>	a) insitu в песках техноэлювия, %	0,120	0,210
	b) в эродированных песках, т/т	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
	c) валовой прессинг на урбоэкосистему, т/год	0,245	10,305
	d) прессинг за период 1996–2011 гг., т	3,700	154,600
<b>Zn</b>	a) insitu в песках техноэлювия, %	0,080	0,100
	b) в эродированных песках, т/т	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	c) валовой прессинг на урбоэкосистему, т/год	0,163	4,907
	d) прессинг с 1996 г., т	2,400	73,600
<b>Cu</b>	a) insitu в песках техноэлювия, %	0,040	0,020
	b) в эродированных песках, т/т	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	c) валовой прессинг на урбоэкосистему, т/год	0,082	0,981
	d) прессинг за период 1996–2011 гг., т	12,300	14,700
<b>W</b>	a) insitu в песках техноэлювия, %	0,140	0,080
	b) в эродированных песках, т/т	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
	c) валовой прессинг на урбоэкосистему, т/год	0,286	3,926
	d) прессинг за период 1996–2011 гг., т	4,300	58,900
<b>Mo</b>	a) insitu в песках техноэлювия, %	0,015	0,020
	b) в эродированных песках, т/т	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	c) валовой прессинг на урбоэкосистему, т/год	0,031	0,981
	d) прессинг за период 1996–2011 гг., т	0,500	14,700

Как установлено почвенно-геохимическими исследованиями (Куликов и др., 2012), содержание кадмия в техноэлювии обоих участков составлял 0,001 %, или 10 г/т.

Малое содержание кадмия объясняется с его относительной редкостью и рассеянностью. Кларк кадмия в земной коре равняется 0,13 мг/кг (0,13 г/т) (Виноградов, 1962). Сам металл не имеет токсикологического значения. Он становится токсичным при переходе в оксид.

Условно принимается, что в стоках наносов содержание кадмия остается таким же как в песках техноэлювия. При таких допущениях в урбоэкосистему Закаменска с площади первого участка ежегодно попадает кадмия в количестве 0,002 т (2 кг). Только со времени закрытия горнодобывающего производства (1996 г.) на территорию города с эрозионными стоками попало 0,03 т. Жидкий и твердый сток со стороны второго участка попадает в водоток. Загрязнение кадмием гидроэкосистемы со стороны второго участка на порядок больше. Другие металлы в песках техноэлювия содержатся в значительно больших количествах. Так, ртуть после прекращения промышленных работ в гидроэкосистеме оказалась в количестве 3,7 и 155 т, соответственно с первого и второго участков. Другие металлы в загрязнении водной системы по абсолютной массе участвуют в меньшей степени.

Другим типом опустынивания на урбанизированной территории является дефляция.

Критическая скорость ветра для частиц разного диаметра различна. Это объясняет сортировку минеральных частиц по диаметру. Сортировка частиц приводит к образованию в одном случае песчаных пустынь, а в другом — глинистых, а также лессовых отложений на окружающих пустыни территориях. Обычно на месте остаются частицы менее 0,01 и более 1 мм, а крупнопылеватые частицы размером 0,01–0,05 мм выносятся на большие расстояния и оседают в виде лессов. По свидетельству М. И. Долгилевича (1978), дальность переноса тонкодисперсного материала при пыльных бурях достигает до 4000 км. Именно в результате такой сортировки образовались отложения лессов на периферии пустынь. Справедливо можно утверждать, что Лессовое плато и плодороднейшие почвы хейлуту, сформировавшиеся за более чем 4000-летнюю историю окультуривания, своим образованием обязаны золотому материалу, вынесенному из Центральноазиатских степей. Установлено сходство материала пылевых бурь Центральной Азии, Китая, Приморья по химическому составу (Тюменцева, 2013). При этом важно в будущем показать общность песков Центральной Азии и лессов поймы Хуанхэ по микроэлементному составу, наличию редких элементов. По материалам НАСА установлено, что каждый год из Центральноазиатского региона до Северной Америки достигает 56 млн. т пыли. Особенно активно пыль летит весной в связи с увеличением частоты циклонов и сильными западными ветрами, преобладающими в средних широтах (<http://www.esoreiter.ru>).

Из центральной и западной части Сахары пыльные бури проникают в воздушное пространство над Атлантическим океаном. Взятые пробы показывают, что пыль может распространяться до Южной и Центральной Америки. Для многих азиатских стран, включая Корею, весной становится актуальным прогноз содержания в воздухе желтой пыли (YellowDust, Yellowsand, AsianDust) при развитии, так называемых желтых пыльных бурь. Для предотвращения пыльных бурь, которые нарушают работу многих электронных средств в Монголии, в пустыне Гоби, с помощью международного сообщества организована программа «зеленая стена» (greenbelts) и начинаются исследования по фитомелиоративному закреплению песков.

В современную эпоху все более актуальной становится проблема прогноза пыльных бурь. Разработкой методик распознавания и проведением космического мониторинга пыльных бурь занимаются с конца 90-х годов. Дешифрирование пыльных бурь и оценка их основных характеристик: направление выноса и длина пылевого шлейфа, площадь распространения бури, число и площадь источников выноса и др. проводится с помощью специального нормализованного дифференциального пылевого индекса NDDI (normalizeddifferencedustindex), который при исследовании пыльных бурь в Северном Китае и Монголии по данным MODIS ввели китайские ученые (<http://www.esoreiter.ru>).

ДПВ – дефляционный потенциал ветра ( $r_i$ ) рассчитывается по формуле:

$$r_i = 0,001 \cdot V_i^3 \cdot f_j, \quad (14)$$

где  $V_i^3$  — скорость ветра в группе скоростей  $i$ ,  $f_j$  — продолжительность ветра в % от общего периода в направлении  $j$  и при группе скоростей  $i$ . Расчет ДПВ ведется по каждому месяцу как сумма по каждому направлению из восьми румбов.

При прогнозировании дефляции почв исходят из того, что кинетическая энергия ветра прямо пропорциональна кубу его скорости и обратно пропорциональна квадрату влажности почв. Дефляционная работа ветра, имеющего, например, скорость 4 м/с, будет превышать работу ветра, имеющего скорость 2 м/с, не в два, а в 8 раз.

Климатический показатель дефляции (С):

$$C = \frac{10^2 \cdot V^3}{(H/T + 10)^2}, \quad (15)$$

где V, H, T — среднегодовые значения скорости ветра, количества осадков, температуры воздуха. В числителе – куб скорости ветра, в знаменателе – квадрат влажности.

Климатический фактор дефляции почв можно также определить по выражению:

$$C = \frac{34,486 \cdot 10^2 \cdot V^3}{(P - E)^2}, \quad (16)$$

где в числителе куб скорости ветра, в знаменателе квадрат влажности в виде квадрата разности осадков (P) и испаряемости (E).

При годовом эрозионном потенциале ветра 50–100, в регионе возникает в среднем за год 2–5 пыльных бурь (Баженова, 1997). Для песков техноэлювия противодефляционная устойчивость минимальна и равна 15. Вероятность дефляции почв оценивается баллом 4, т. е. как высокая. Эоловая аккумуляция достигает 10 т/га/год.

При дефляции с загрязненным песком на территорию города и в гидроэкосистемы заносятся те же элементы, которые содержатся в техноэлювии (табл. 4).

Таблица 4

Дефляционное загрязнение территории Закаменска тяжелыми металлами

Элемент-загрязнитель	Содержание	1-й участок	2-й участок
<b>Cd</b>	а) в эродированных песках, т/т	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$17,04 \cdot 10^{-3}$
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	0,05	0,24
<b>Pb</b>	а) в эродированных песках, т/т	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	0,37	3,58
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	5,6	53,7
<b>Zn</b>	а) в эродированных песках, т/т	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	0,24	1,70
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	3,6	25,5

<b>Cu</b>	а) в эродированных песках, т/т	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	0,12	0,34
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	1,8	5,1
<b>W</b>	а) в эродированных песках, т/т	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	0,43	1,36
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	6,5	20,4
<b>Mo</b>	а) в эродированных песках, т/т	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	б) валовой прессинг со всей площади участка на урбоэкосистему, т/год	0,05	0,34
	с) прессинг за период 1996-2011 гг., т	0,8	5,1

С момента закрытия горнодобывающего предприятия (1996 г.) в первом участке дефляционное загрязнение вольфрамом достигло 6,5 т. Гидроэкосистема получила со второго участка этого металла в количестве 20 т. Также велики аэральные поступления свинца, меди и др.

Загрязнение тяжелыми металлами оказывает негативное влияние на здоровье жителей Закаменска. Загрязнение воздуха явилось причиной увеличения рисков таких болезней, как инсульт, болезни сердца и рак легких, а также хронические и острые респираторные заболевания, включая астму. Поэтому необходимо срочное проведение рекультивации и ремедиации загрязненных песков техноэлювия Закаменска и реабилитации территории.

#### **Заключение**

Тотальная урбанизация вызвала трансформацию природной среды и широкое распространение своеобразных урбоэкосистем и особых почв – урбоземов. Урбоэкосистемы и урбоземы подвержены многочисленным деструктивным процессам, объединенным под понятием урбоопустынивания. Территория г. Закаменска унаследовала от горнодобывающей деятельности бывшего Джидинского вольфрамово-молибденового комбината огромные массивы техногенных песков со столь высоким содержанием тяжелых металлов, что они представляют интерес для вторичных разработок. Тем самым, урбоопустынивание Закаменска связано с химическим загрязнением песчаного техноэлювия, разносимого водными и ветровыми потоками по широкому периметру. Для расчета эрозии техноэлювия с поллютантами применено универсальное уравнение USLE, а дефляционное загрязнение рассчитывалось, исходя из известного положения, что кинетическая энергия ветра прямо пропорциональна кубу его скорости и обратно пропорциональна квадрату влажности почв. Получены количественные параметры загрязнения урбоземов Закаменска такими приоритетными металлами как Cd, Pb, Zn, Cu, а также Mo и W. Получено, что эрозионные потери загрязненных песков колеблются от 6,7 до 28,8 т/га/год, а дефляционные потери достигают 10 т/га/год. При этом в урбоэкосистему только с водными потоками, только ртути и только с 1996 г. (время закрытия комбината) попало примерно 155 т. При учете дефляционного загрязнения эта величина возрастет не менее, в 2 раза.

### Литература

1. Прокофьева Т. В. Городские почвы, запечатанные асфальтобетонными покрытиями (на примере г. Москва). Дис. ... канд. биол. н. М., 1998. 121 с.
2. Бармин А. Н., Синцов А. В. Современная классификация почвенного покрова городских территорий // Геология, география и глобальная энергия. 2011. № 3. С. 149–155.
3. Осинцева Н. В. Физико-географические факторы развития овражной эрозии городских земель // Дисс. на соиск. уч. степени канд. геогр. наук. – Томск, 2001. – 28 с.;
4. Ковалев, С. Н. Развитие оврагов на урбанизированных территориях: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2009. — 24 с.
5. Кузнецов М. С., Глазунов Г. Л. Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 2004. – 351 с.
6. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация.
7. Иванов А. Д. Некоторые итоги изучения эоловых песков и дефляции почв Забайкалья // Ветровая эрозия почв и меры борьбы с ней / Тр. ИЕН БФ СО АН СССР, 1971. Вып. 9. С. 131–137.
8. Wishmeier W. H., Smith D. D. Predicting rainfall erosion losses // USDA Agr. Handbook 537, Washington, 1978. 65 p.
9. Кузнецов М. С., Глазунов Г. П. Эрозия и охрана почв. Издательство: МГУ, КолосС, 2004 г. 352 с.
10. Толчельников Ю. С. Эрозия и дефляция почв. Способы борьбы с ними. – М.: Агропромиздат, 1990. 158 с.
11. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 200 с.
12. Литвин Л. Ф., Кирюхина З. П. Почвенно-эрозионная миграция биогенов и загрязнение поверхностных вод // Эрозия почв и русловые процессы, 2004. Вып. 14. С. 45–64.
13. Белоцерковский М. Ю., Топунов М. В. Затраты на противоэрозионные мероприятия по сохранению плодородия почв при существующем сельскохозяйственном использовании земель // <http://makkaveev-lab.narod.ru/Aros-Chanel-1996.pdf>.
14. Литвин Л. Ф., Кирюхина З. П., Добровольская Н. Г. Современная динамика земельной эрозии в России // <http://makkaveev-lab.narod.ru/SEFP18-2.pdf>.
15. Куликов А. И., Мангатаев А. Ц., Куликов М. А., Хамнаева Г. Г., Плюсин А. М. Экологическое зонирование и статистические параметры экологически опасных зон города Закаменска (Республика Бурятия) // Вестник ВСГУТУ, 2012. № 3(38). С. 221–227.
16. Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962., №7. С. 555–571.
17. Долгилевич М.И. Пыльные бури и агролесомелиоративные мероприятия М.: Колос, 1978. 159 с.
18. Тюменцева Е.М. Применение статистических методов при изучении эоловых процессов // Вестник кафедры географии ВСГАО. 2013. № 1–2 (7). С. 38–46.
19. <http://www.esoreiter.ru>
20. John J. Qu, Xianjun Hao, Menas Kafatos, and Lingli Wang. Asian Dust Storm Monitoring Combining Terra and Aqua MODIS SRB Measurement // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 3, no. 4, October 2006. P. 284-486.
21. Баженова О. И., Любцова Е. М., Рыжов Ю. В., Макаров С. А. Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. СПб: «Наука» РАН, 1997. 201 с.

**DESERTIFICATION AND POLLUTION OF HEAVY METALS IN URBAN AREAS  
(BY THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF BURYATIA ZAKAMENSK)**

**A. I. Kulikov, N. N. Нaptukhaeva, N. B. Badmaev**

**Kulikov Anatoly Innokentievich**

Doctor of Biological Sciences, Professor  
Institute of General and Experimental Biology SB RAS  
670047, Russia, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6.  
E-mail: kul-an52@mail.ru

**Нaptukhaeva Nona Nikolaevna**

Cand. Sci. (Biol.), Researcher  
Institute of General and Experimental Biology SB RAS  
670047, Russia, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6.  
E-mail: nonakhapt@mail.ru.

**Badmaev Nimazhap Bayarzhapovich**

Doctor of Biological Sciences, Professor  
Institute of General and Experimental Biology SB RAS  
670047, Russia, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6.  
E-mail: nima\_b@mail.ru.

Discusses environmental problems of urban areas on the example of the Republic of Buryatia Zakamensk. Urboopustynivanie is linked to chemical pollution, sandy tehnoljuvija, distribution of pollutants in water and wind flow across a wide perimeter. Identify indicators loads on the investigated territory. To calculate erosion tehnoljuvija with levels applied universal equation USLE and deflationary contamination was calculated on the basis of known position that the kinetic energy of the wind is directly proportional to the cube of its speed and back proportional to the square of the soil moisture. Quantitative parameters obtained pollution urbozemov Zakamensk priority metals as Cd, Pb, Zn, Cu, as well as Mo and W. Obtained that erosive loss contaminated sands range from 6.7 to 28.8 t/ha/year, and deflationary loss reach 10 t/ha/ year. While urbojekosistemu only with water jets, only mercury and only from 1996 (closing time of the plant) is horrible around 155 t. Taking into account deflationary to increase this quantity pollution in 2 times.

**Keywords:** urban ecosystem; tehnoljuvij; urbanity desertification; environmental sustainability; erosion; deflation; erosion pollution; pollution parameters; erosion losses; gully formation along; heavy metals.