

Интегральный параметр критических нагрузок как основа экологического нормирования загрязнения ландшафтов тяжёлыми металлами

© 2017. С. А. Тобратов, к. б. н., доцент, руководитель лаборатории,
Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина,
390000, Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46,
e-mail: tobratvsa@mail.ru

Предложен способ оценки ассимиляционного потенциала ландшафтов на основе допустимого накопления тяжёлых металлов (ТМ) в трёх средах: фитомассе, поверхностных водах и почвенном покрове. Подобно известному методу критических нагрузок (КН), предлагаемый способ направлен на выявление природных механизмов самоочищения экосистем от загрязняющих веществ и индикацию ранних стадий антропогенного химического загрязнения. Однако, в отличие от КН, предложенный метод учитывает экологическую роль депонирующей способности почвенного покрова, что позволяет дать значительно более объективную оценку ассимиляционного потенциала экосистем. В основу такой оценки положены экологические нормативы – верхние пределы природообусловленного накопления нормируемых элементов в природных средах, являющиеся альтернативой предельно допустимым концентрациям и устанавливаемые в ходе региональных эколого-геохимических исследований.

В отличие от ПДК, экологические нормативы (ЭН) являются динамическими величинами и позволяют учесть региональную геохимическую специфику, природную мозаичность почвенного покрова и даже многолетнюю эволюцию ландшафтов (например, при глобальном потеплении). Однако разработка ЭН требует создания значительной по объёму базы данных по почвенным концентрациям ТМ (в нашем случае – 325 пунктов, 1 точка опробования на 5–6 км²), что необходимо для выявления устойчивых генетических группировок почв при помощи кластерного анализа. Для каждой такой генетической группы в ходе вариационного анализа устанавливается ЭН – верхний природообусловленный предел накопления элемента, соответствующий уровню доверительной вероятности 99%. В дальнейшем применяется расчётная схема, позволяющая оценить допустимую скорость ежегодной аккумуляции ТМ в верхнем корнеобитаемом 0–20 см слое почв. Данное слагаемое суммируется с «классическим» двухкомпонентным вариантом КН, в результате чего рассчитывается предлагаемый нами трёхкомпонентный интегральный параметр критических нагрузок.

Показано, что гранулометрический состав является основным фактором эколого-геохимической устойчивости почв. Установлено, что для ландшафтных систем наиболее опасны элементы с высокой миграционной способностью и низкой биофильностью.

Ключевые слова: экологическое нормирование, критические нагрузки, тяжёлые металлы, геохимическая устойчивость ландшафтов.

Integral parameter of critical loads as a basis for environmental regulation of landscapes contamination with heavy metals

S. A. Tobratov,
Ryazan State University n.a. S. A. Yesenin,
46 Svoboda St., Ryazan, Russia, 390000,
e-mail: tobratvsa@mail.ru

The method of evaluation of landscape carrying capacity on the basis of the permissible limits for heavy metal accumulation in phytomass, surface waters and soils has been suggested. Like the already known method of critical loads (CL), the proposed method aims to identify natural mechanisms of ecosystem self-purification from pollutants and to indicate the early stages of anthropogenic chemical contamination. However, in contrast to CL, the proposed method takes into account the ecological role of depositing ability of the soil cover, which allows it to give a much more objective assessment of ecosystem carrying capacity. This assessment is based on ecological standards which are the upper limits of accumulation of regulated elements in environments, which are safe for environment. Ecological standards are the alternative to the maximum permissible concentrations (MPC) and are included in regional ecological-geochemical studies.

Compared to the MPC, environmental standards are dynamic parameters and thus they make it possible to take the regional geochemical specifics, natural patterns of soil cover and even years-long landscapes evolution into account (for instance, during

global warming). The development of ES requires a substantial database on HM concentrations in soil (in our case – 325 points, 1 soil sample for 5–6 km²) which is necessary to identify sustainable pedogenic groups by means of cluster analysis. When variance analysis is performed an environmental standard is set for each pedogenic group as the upper natural limit of HM accumulation, which corresponds to confidence probability limit of 99%. Further on a calculation algorithm is applied which allows to evaluate acceptable annual soil deposition of metal in the upper (0–20 cm) layer. The given number is summed up with the “traditional” two-component variant of CL, as a result the suggested three-component integral parameter of critical load is calculated. It has been shown that soil granulometric composition is a major factor of ecological and geochemical soil stability.

It has been found out that the elements with high migration ability and low biophilic properties have the greatest danger for landscape systems.

Keywords: environmental regulation, critical loads, heavy metals, landscape geochemical stability.

Традиционные подходы к оценке химического загрязнения на основе гигиенических нормативов (предельно допустимых концентраций – ПДК) имеют недостатки [1]. ПДК – нединамические величины, не позволяющие учесть вариации природных геохимических режимов. Они основываются на антропоцентрическом подходе (приоритет здоровья населения), а состояние подвергающихся загрязнению природных экосистем недооценивается. И это закономерно: ПДК устанавливаются для отдельных природных компонентов, что делает крайне затруднительной оценку состояния целостных систем. Превышение ПДК часто означает, что уже началась необратимая деградация экосистем, а её ранние стадии просто не были замечены.

Указанных недостатков лишен альтернативный подход – экологическое нормирование техногенеза на основе методологии критических нагрузок (КН), которая активно разрабатывается в рамках Конвенции ООН по трансграничному загрязнению воздуха. КН – максимальное поступление загрязняющих веществ, которое не сопровождается необратимыми изменениями в биохимической структуре и продуктивности экосистем в течение длительного времени (соответствует характерному времени сукцессий в лесных экосистемах – около 100 лет) [2]. Если поступление элемента не превышает КН, то экосистема перерабатывает его поток за счёт естественных буферных механизмов без разбалансировки геохимических равновесий.

При оценке устойчивости экосистем к антропогенному поступлению тяжёлых металлов (ТМ) используется упрощенное уравнение масс-баланса [3]:

$$M_{dep} = M_{upt} + M_{leach}, \quad (1)$$

где M_{dep} – общее поступление металла, M_{upt} – накопление металла в ежегодном приросте фоновой и/или культурной растительности, M_{leach} – вынос со стоком.

$$M_{upt} = G_{an} \cdot C_{backM}, \quad (2)$$

где G_{an} – годовая продукция биомассы, подвергающейся отчуждению при заготовках (древесина, товарная продукция агроценозов), C_{backM} – максимально допустимая концентрация металла (для агроценозов можно использовать ПДК, для лесных экосистем необходимо экспериментальное определение C_{backM} [1]).

$$M_{leach} = Q_{runoff} \cdot C_{waterMPL}, \quad (3)$$

где Q_{runoff} – годовой сток, $C_{waterMPL}$ – максимально допустимая (например, не превышающая ПДК) концентрация металла в воде.

Критическая нагрузка ТМ ($CL(M)$) рассматривается как верхний предел параметра M_{dep} . Соответственно, на основе (1) получается следующая модель:

$$CL(M) = M_{upt} + M_{leach}, \quad (4)$$

Смысл «классической» трактовки $CL(M)$ состоит в том, что все экзогенные элементы должны «перерабатываться» в процессе биогенной и абиогенной миграции. Однако такой двухкомпонентный подход не учитывает депонирующую способность почвенного покрова [1], что приводит к неоправданному занижению КН. Мы предлагаем следующий алгоритм учёта почвенно-геохимического вклада в ассимиляционный потенциал ландшафтов:

- сбор информации – почвенное опробование и лабораторные испытания;
- выявление и типизация фоновых почвенно-геохимических режимов;
- определение для генетических группировок почв верхнего предела природообусловленного накопления ТМ – экологического норматива (ЭН – альтернатива ПДК), превышение которого сигнализирует о ранних стадиях антропогенного загрязнения;
- сопоставление ЭН с текущим уровнем накопления элемента в почве и расчёт допустимого темпа депонирования ТМ.

Таблица 1

Экологические нормативы содержания ТМ в почвах Рязанской области и смежных регионов Центра России, мг/кг [1]

Почвенная группировка		Форма нахождения	Cu	Zn	Pb	Cd
Автоморфные	Песчаные	подвижная	0,24	6,0	3,7	0,055
		валовая	2,35	165,0	11,4	0,340
	Легкосуглинистые	подвижная	0,29	6,9	1,4	0,094
		валовая	18,20	114,0	15,5	0,315
	Средне- и тяжёлосуглинистые	подвижная	0,51	14,0	3,0	0,102
		валовая	23,50	(255,0) ¹	17,4	0,365
Торфяные		подвижная	0,32	2,45	5,4	0,078
		валовая	17,50	57,0	8,6	0,400
Аллювиальные суглинистые		подвижная	0,87	(27,3) ²	4,3	0,210
		валовая	28,00	214,0	40,0	0,440

Примечания. Формы нахождения ТМ в почвах: подвижная – экстракция ацетатно-аммонийным буфером с рН=4,8; валовая (несиликатная) – экстракция царской водкой. В скобках приведены экологические нормативы, превышающие соответствующие ПДК. Вместо них следует использовать гигиенические нормативы: ¹ – 220 мг/кг, при рН_{ксл} < 5,5 – 110 мг/кг (ОДК); ² – 23,0 мг/кг (ПДК).

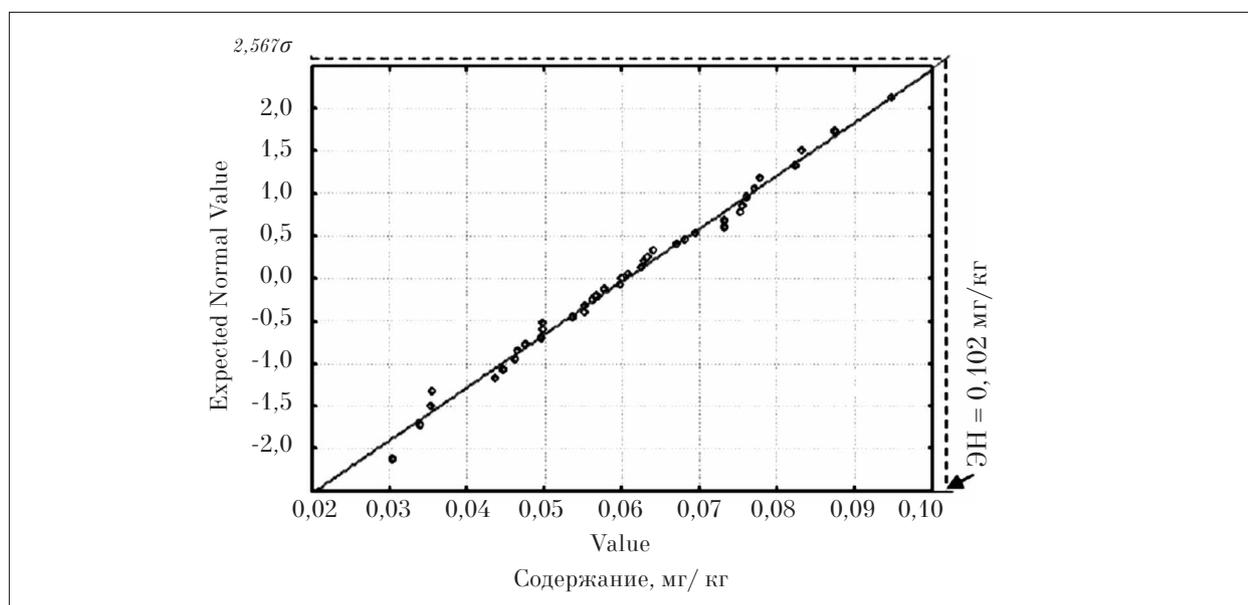


Рис. 2. Пример установления экологического норматива: концентрация подвижных форм кадмия в суглинистых почвах (уровень доверительной вероятности 99%)

В ходе полевых исследований на модельной территории в центре Рязанской области (на границе зон подтайги, широколиственных лесов и лесостепи) нами было отобрано 325 почвенных проб (1 проба на 5–6 км²), в которых определено содержание валовых несиликатных и подвижных форм Cu, Zn, Pb и Cd. Далее при помощи кластерного анализа (метод Варда, дистанции Евклида) определено наличие 4 фоновых почвенно-геохимических режимов, которые, как следует из рисунка 1 (см. обложка, с. 3), различаются в основном по особенностям гранулометрического состава, что типично для центра Русской равнины.

Для каждой из 4 типологических почвенных групп при помощи вариационного анализа [4] рассчитаны ЭН, в основу которых положены нормированные отклонения от среднего на уровне доверительной вероятности 99% (или $X \pm 2,567\sigma$; рис. 2, см. обложка, с. 3, и табл. 1). Вероятность превышения ЭН, определённого таким способом, в фоновых условиях пренебрежимо мала, а если превышение имеется, то оно, скорее всего, обусловлено техногенным влиянием.

При расчёте допустимого темпа депонирования ТМ в почве следует предусматривать возможность прогрессирующего накопления ТМ в подвижных формах и учитывать, что

данный темп не должен нарушать почвенно-геохимические равновесия на протяжении не менее 100 лет. Таким образом, получаем следующую модель:

$$SD(M)_{an(acc)} = \frac{\mathcal{E}H^{node} - C_i^{node}}{100} \cdot \rho \cdot 2000, \quad (5)$$

где $SD(M)_{an(acc)}$ – приемлемая интенсивность ежегодного депонирования ТМ (*acceptable annual soil deposition of metal*) в верхнем 0–20 см слое почвы, г/(га · год); $\mathcal{E}H^{node}$ – экологический норматив почвенных концентраций подвижных форм ТМ, мг/кг (табл. 1); C_i^{node} – фактическая концентрация подвижных форм ТМ в данной почве, мг/кг; ρ – плотность почвы в естественном сложении, т/м³; 2000 – коэффициент пересчёта на площадь.

Вышесказанное позволяет существенно дополнить концепцию критических нагрузок, введя понятие интегрального параметра КН $IPCL(M)$:

$$IPCL(M) = CL(M) + SD(M)_{an(acc)} = M_{upt} + M_{leach} + SD(M)_{an(acc)}. \quad (6)$$

Значения $IPCL(M)$, выраженные в удельных единицах допустимого поступления ТМ, позволяют планировать природопользование с учётом пространственных неоднородностей ассимиляционного потенциала (рис. 3, см. обложка, с. 3). Они определяют уровень

ежегодных выпадений ТМ, который гарантированно не приведёт к нарушению почвенно-геохимических равновесий, деградации биоблока и загрязнению природных вод. На рисунке 3 хорошо заметна мозаичность геохимической устойчивости ландшафтов, а также то, что для каждого элемента характерны уникальные пространственные черты такой устойчивости.

Как следует из рисунка 4, основным фактором геохимической устойчивости является биофильность элемента, в связи с чем наименее опасны для экосистем биофилы Cu и Zn. Кроме того, КН по «классической» модели (4) явно недоучитывает ассимиляционный потенциал ландшафтов, а параметр $SD(M)_{an(acc)}$ позволяет дать ему более объективную оценку. Особенно велик вклад $SD(M)_{an(acc)}$ для Pb (достигает 80% от $IPCL$), что объясняется способностью Pb к специфической адсорбции гумусовыми кислотами [5]. Впрочем, «запас прочности» геосистем к выпадениям Pb значительно ниже, чем биофильных Cu и Zn (рис. 4). Для наиболее подвижного [5, 6] и токсичного кадмия не только CL , но и $IPCL$ оказались ниже модуля атмосферных выпадений, что характеризует Cd как приоритетный загрязнитель ландшафтов региона.

Таким образом, предложенный нами трёхкомпонентный интегральный параметр критических нагрузок позволяет повысить объективность экологического нормирования антропогенного загрязнения и управленческих

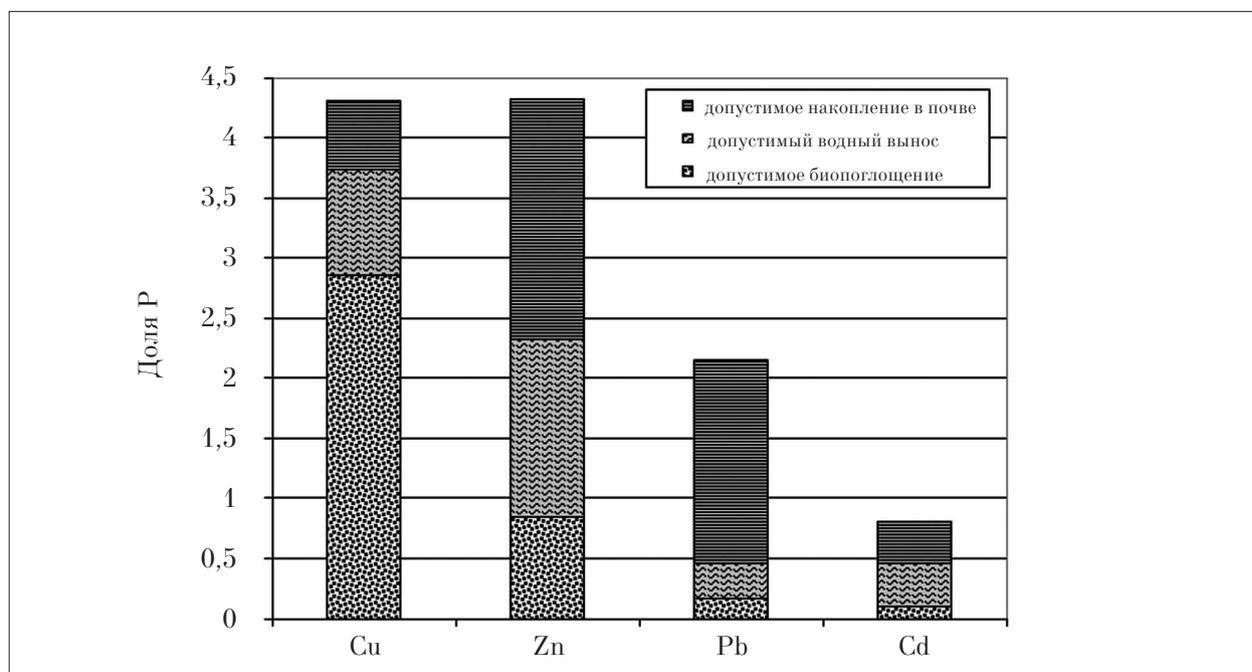


Рис. 4. Соотношение слагаемых $IPCL$ тяжёлых металлов в единицах их среднерегionalной атмосферной поставки (P)

решений в сфере природопользования. Наименьшей опасностью для природных ландшафтов обладают биофильные элементы, способные накапливаться на почвенно-геохимических барьерах, а приоритетными загрязнителями являются миграционно активные токсиканты.

Литература

1. Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В., Комаров М.М., Железнова О.С., Соловьева Е.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области. Рязань: Изд-во РГУ им. С.А. Есенина, 2011. 760 с.
2. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 2004. [Электронный ресурс] <http://www.icpmapping.org/> (Дата обращения 02.11.2016).
3. Охрана природы. Городские экосистемы. Расчёт величин критических нагрузок загрязнителей на городские экосистемы. Методические рекомендации. Москва – Смоленск: Маждента, 2004. 56 с.
4. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. Москва: Академия, 2004. 416 с.
5. Ладонин Д.В., Марголина С.Е. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжёлыми металлами // Почвоведение. 1997. № 7. С. 806–811.

6. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 268 с.

References

1. Krivtsov V.A., Tobratov S.A., Vodorezov A.V., Komarov M.M., Zheleznova O.S., Solov'eva E.A. Natural potential of Ryazan region landscapes. Ryazan: Izd-vo RGU im. S.A. Esenina, 2011. 760 p. (in Russian).
2. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 2004. [Electronic resource] <http://www.icpmapping.org/> (Date of the application 02.11.2016).
3. Nature protection. Urban ecosystem. Calculation of critical loads of pollutants in urban ecosystems. Methodical recommendations. Moscow – Smolensk: Mazhdenta, 2004. 56 p. (in Russian).
4. Puzachenko Yu.G. Mathematical methods in ecological and geographical studies. M.: Akademiya, 2004. 416 p. (in Russian).
5. Ladonin D.V., Margolina S.E. Interaction of humic acids with heavy metals // Pochvovedenie. 1997. № 7. P. 806–811 (in Russian).
6. Linnik P.N., Nabivanets B.I. Forms of metal migration in fresh surface waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 268 p. (in Russian).