ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 492, № 2, с. 77–86

ГЕОГРАФИЯ

УДК 911.9:504.054:547.62

СОПРЯЖЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ НА ВОДНЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА СЕЛЕНГИ)

© 2020 г. М. Ю. Семенов[1,*], член-корреспондент РАН В. А. Снытко[2], А. В. Силаев[3], Ю. М. Семенов[3]

Поступило 05.02.2020 г.
После доработки 20.02.2020 г.
Принято к публикации 30.03.2020 г.

Предложен подход к сопряженной оценке величин допустимых нагрузок загрязнителей на водные и наземные экосистемы. Подход основан на оценке скорости удаления (ассимиляции) или поступления загрязнителя по разности его массового расхода в нижнем и верхнем створах выбранного участка реки. Эта скорость рассматривалась как величина современной нагрузки загрязнителя на речную экосистему ($СН_Р$). Максимально допустимое поступление загрязнителя между створами, рассчитанное на основе ПДК, рассматривалось как предельно допустимая нагрузка ($ПДН_Р$). Разность между $ПДН_Р$ и $СН_Р$ рассматривалась как остаток лимита загрязнителя речной экосистемы или как допустимая нагрузка. Скорость атмосферных выпадений загрязнителя рассматривалась как современная нагрузка загрязнителя на геосистему в целом ($СН_Г$). Сумма скорости отчуждения загрязнителя в результате вырубок и скорости ассимиляции/поступления загрязнителя в реке, отнесенная к площади дренируемого участка водосбора, рассматривалась как предельно допустимая нагрузка ($ПДН_Г$). Разность между $ПДН_Г$ и $СН_Г$ рассматривалась как остаток лимита загрязнителя геосистемы или как допустимая нагрузка.

Ключевые слова: допустимые нагрузки, загрязнители, водные экосистемы, самоочищение, геосистемы

DOI: 10.31857/S2686739720060171

Недостатком концепции допустимых нагрузок является раздельный подход к их определению для наземных и водных экосистем [1]. Река и возвышающиеся над ней склоны гор являются классическим примером геохимического сопряжения наземных (элювиальных, трансэлювиальных, супераквальных) и аквальных ландшафтов, связанных нисходящим потоком вещества [2]. Поэтому сопряженная оценка нагрузок загрязнителей для них не только возможна, но и обязательна. Река является реципиентом вещества, поступающего с водосбора, поэтому расчет нагрузок для геосистемы должен базироваться на результатах расчета нагрузки на речную экосистему. Величина нагрузки должна учитывать не только критерии устойчивости экосистем (вроде предельно допустимых концентраций – ПДК) и классические статьи бюджета загрязнителей (вроде величины атмосферных выпадений загрязнителя, изъятия в результате вырубок и т.д.), но и способность экосистем к самоочищению. Особенно это актуально для рек [3].

На сегодняшний день в отечественной литературе четкой дефиниции термина “самоочищающая способность реки” не существует. Близким к нему по смыслу понятием является “ассимилирующая способность водного объекта” [4], которое трактуется как его способность принимать определенную массу загрязняющих веществ в единицу времени без нарушения норм качества воды в контрольном пункте или пункте водопользования [5]. Наиболее очевидным и поддающимся моделированию механизмом ассимиляции загрязнителя является разбавление – увеличение

[1] *Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*
[2] *Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Россия*
[3] *Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*
**E-mail: smu@mail.ru*

отношения расходов речной и сточной вод вниз по течению [6]. Поэтому он повсеместно распространен.

Однако, расчет уменьшающейся по течению концентрации загрязнителя вследствие увеличения расхода воды по таким методикам может иметь смысл лишь при оценке качества воды. Для оценки изменения количества загрязнителя в реке, необходимого для расчета нагрузок, такой расчет смысла не имеет, поскольку количество загрязнителя равно произведению его концентрации на объем воды, и при таком подходе не меняется. В реальности же оно не может не меняться, так как в реке идут процессы самоочищения (сорбция донными осадками, разложение органики, фильтрация в аллювиальные отложения) и процессы загрязнения (точечное и диффузное поступление загрязнителей, десорбция загрязнителя из донных осадков, синтез органического вещества и т.д.).

Поэтому оценить изменение количества загрязнителя в реке возможно только на основе балансового подхода – по разности количеств загрязнителя на входе и выходе с участка реки. Такой подход позволяет рассчитать “сальдо” – разность между поступлением и расходом вещества за определенный промежуток времени. Положительное сальдо означает превышение поступления загрязнителя над ассимиляцией, а отрицательное – наоборот. Такое сальдо можно рассматривать как современную нагрузку на речную экосистему ($СН_Р$):

$$СН_Р, мг/с = Q_x K_x - Q_{x-1} K_{x-1}, \quad (1)$$

где K – современная концентрация загрязнителя в воде, мкг/л, Q – расход воды в створе, м^3/с, а индексы x и $x-1$ обозначают нижний и верхний створы соответственно.

Чтобы оценить, как в результате гидрологических процессов будет меняться количество вещества в реке при ПДК загрязнителя в воде, было рассчитано такое же сальдо, названное предельно допустимой нагрузкой на речную экосистему ($ПДН_Р$), с подстановкой ПДК вместо K в уравнение (1):

$$ПДН_Р, мг/с = Q_x ПДК - Q_{x-1} ПДК, \quad (2)$$

где ПДК – предельно-допустимая концентрация загрязнителя в воде, мкг/л.

Разница между современной и предельно допустимой нагрузками была названа остатком лимита загрязнения речной экосистемы ($ОЛЗ_Р$):

$$ОЛЗ_Р, мг/с = ПДН_Р - СН_Р. \quad (3)$$

Положительные величины $ОЛЗ_Р$ означали возможность увеличения поступления загрязнителя, отрицательные – превышение способности реки к его ассимиляции.

Современная нагрузка загрязнителя на геосистему в целом ($СН_Г$) рассматривалась как скорость его поступления с атмосферными выпадениями:

$$СН_Г, кг/км^2/с = ВЫП., \quad (4)$$

где ВЫП. – атмосферные выпадения загрязнителя, кг/км^2/с.

Предельно допустимая нагрузка загрязнителя на геосистему ($ПДН_Г$) рассматривалась как сумма скорости его изъятия в результате вырубок и остатка лимита загрязнения речной экосистемы:

$$ПДН_Г, кг/км^2/с = ВЫРУБ. + ОЛЗ_Р/10^6/П, \quad (5)$$

где ВЫРУБ. – скорость изъятия загрязнителя со стволовой древесиной, кг/км^2/с, П – площадь дренируемой части бассейна, км^2.

Остаток лимита загрязнения ($ОЛЗ_Г$) геосистемы рассматривался как разность между предельно допустимой и современной нагрузками:

$$ОЛЗ_Г, кг/км^2/с = ПДН_Г - СН_Г \quad (6)$$

Расчет $ОЛЗ_Р$ и $ОЛЗ_Г$ для каждого загрязнителя выполнялся отдельно, так как величины K, ПДК, $ПДН_Р$, $СН_Р$, ВЫРУБ. И ВЫП. у каждого загрязнителя свои. Поскольку в течение секунды изменения параметров экосистем, использовавшихся для расчета нагрузок оценить невозможно, все величины пересчитывались на длительность сезона – три месяца. Величины $ОЛЗ_Р \times 10^6/П$ рассчитывались для участков бассейна (рис. 1а) на основе данных о среднегодовом стоке в створах [7] и ПДК для вод рыбохозяйственного назначения [8]. Величины отчуждения загрязнителей в результате вырубки леса (табл. 1) рассчитывались на основе данных об их содержании в древесине [9] и объемах рубок [10]. Для получения сезонных показателей годовые величины делили на четыре, на безлесных территориях (рис. 1б) величины отчуждения с вырубками приравнивались к нулю.

Величины атмосферных выпадений загрязнителей (табл. 1) рассчитывали на основе их концентраций в снеговой воде [11], данных о среднегодовых нормах осадков (рис. 1в) и их внутригодовом распределении [12]. Расчет величин $ОЛЗ_Г$ производился для ландшафтов (рис. 1г), выделенных путем совмещения контуров на рисунках 1а, 1б и 1в. Территории с близкими значениями $ОЛЗ_Г$ объединялись. Пробы воды отбирались в

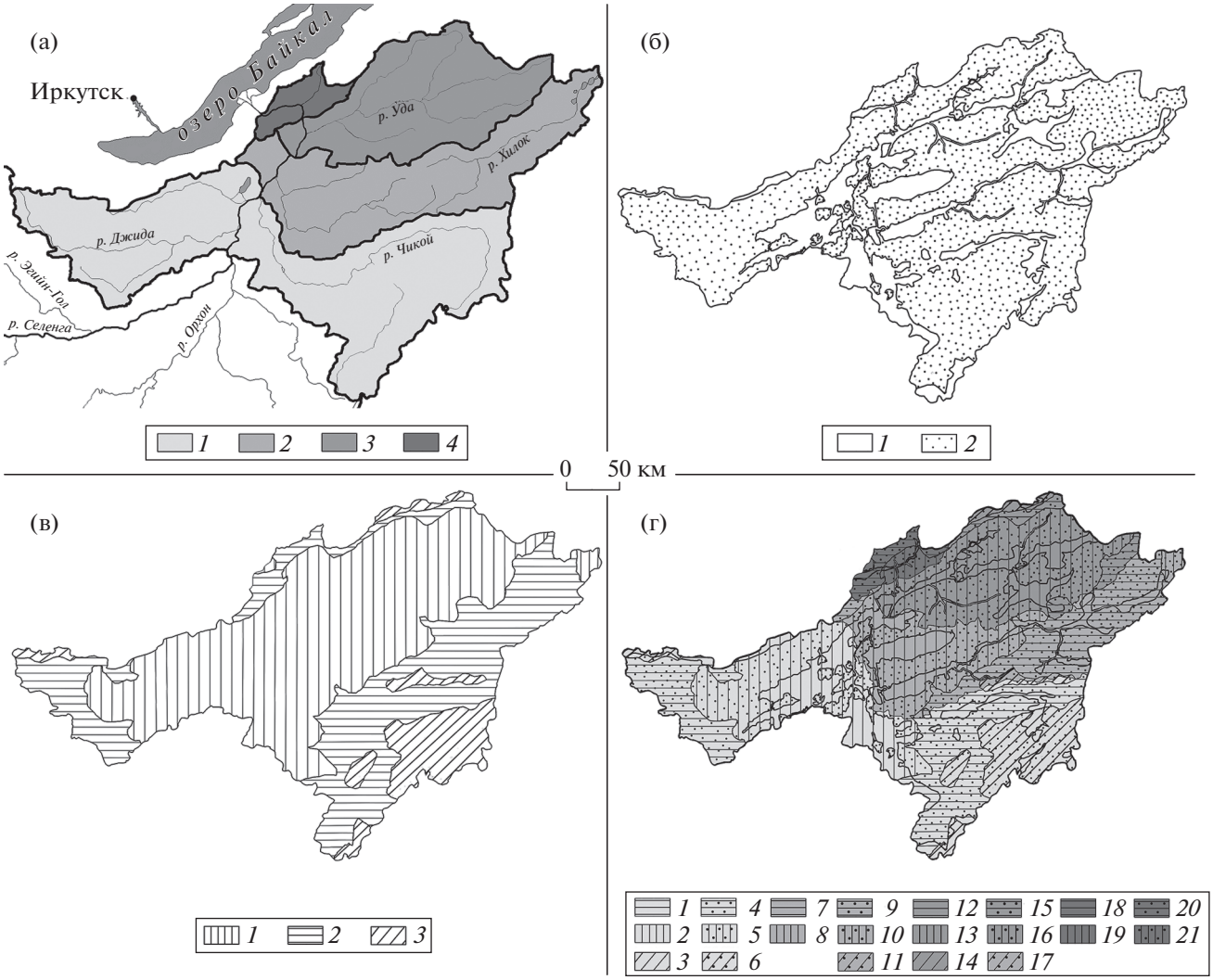

Рис. 1. Пространственная дифференциация исследованных участков бассейна р. Селенги по свойствам, определяющим величину допустимой нагрузки загрязнителя: (а) положение участков в системе высотной поясности (*1* – среднегорный, *2* – средне-низкогорный, *3* – низкогорный, *4* – низкогорно-предгорный); (б) лесистость (*1* – безлесные территории, *2* – лесные); (в) атмосферные осадки, мм/год (*1* – 350, *2* – 450, *3* – 550); (г) контуры ландшафтов, обладающих совокупностью свойств участков, представленных на рисунках 1а, 1б и 1в:

Осадки, мм	Среднегорные		Среднегорно-низкогорные		Низкогорные		Низкогорно-предгорные	
	лесные	безлесные	лесные	безлесные	лесные	безлесные	лесные	безлесные
	Номер контура							
350	*1*	*4*	*7*	*9*	*12*	*15*	*18*	*20*
450	*2*	*5*	*8*	*10*	*13*	*16*	*19*	*21*
550	*3*	*6*		*11*	*14*	*17*		

2017–2019 гг., в качестве загрязнителей рассматривались нитратный азот ($N - NO_3^-$) и некоторые металлы – Sr, Ba, Al, Fe, U, Ni, Zn, V и Cu. Нитраты определялись методом ионной хроматографии, методами определения металлов служили атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная спектрофотометрия, а также масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

Наименьшие современные нагрузки загрязнителей (отрицательные значения CH_P) на реку наблюдаются на незагрязненных участках *1* и *4* зимой и весной, а наибольшие (положительные

Таблица 1. Параметры геосистем, использовавшиеся для расчета остатка лимита загрязнения (ОЛЗ$_Г$), кг/км^2 × 3 мес

Участок №	Осадки, мм	$N\text{-}NO_3^-$	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	U	Ni	Zn	V	Cu
		Отчуждение с древесиной (лето и осень)										
1	550	2	0.007	0.0002	0.02	0.01	0.1	0.000001	0.001	0.01	0.001	0.002
1	450	2	0.007	0.0002	0.02	0.01	0.1	0.000001	0.001	0.01	0.001	0.002
2	450	21	0.07	0.002	0.2	0.09	1.1	0.00001	0.01	0.09	0.01	0.002
2	350	21	0.07	0.002	0.2	0.09	1.1	0.00001	0.01	0.09	0.01	0.002
3	450	17	0.06	0.002	0.1	0.07	0.9	0.00001	0.01	0.08	0.01	0.01
4	350	17	0.06	0.002	0.1	0.07	0.9	0.00001	0.01	0.08	0.01	0.01
		Ассимиляция в реке (лето)										
1	550	–218	–5	–18	–0.2	–0.6	3	–0.3	–0.2	–0.2	0.01	0.02
1	450	–218	–5	–18	–0.2	–0.6	3	–0.3	–0.2	–0.2	0.01	0.02
2	450	71	11	159	2	3	–2	0.2	0.1	–0.5	0.1	0.02
2	350	71	11	159	2	3	–2	0.2	0.1	–0.5	0.1	0.02
3	450	131	7	10	–1	0.4	–3	0.3	0.2	0.5	–0.01	0.03
4	350	–1173	–14	–124	–9	–21	8	–1	–1	–0.9	0.2	0.3
		Ассимиляция в реке (осень)										
1	550	–130	–3	–10	–0.3	–0.5	–0.1	–0.2	–0.1	–0.1	–0.003	0.001
1	450	–130	–3	–10	–0.3	–0.5	–0.1	–0.2	–0.1	–0.1	–0.003	0.001
2	450	65	13	125	0.1	–1	0.1	0.2	0.07	0.05	0.1	0.01
2	350	65	13	125	0.1	–1	0.1	0.2	0.07	0.05	0.1	0.01
3	450	42	1	1	–0.3	1	0.1	0.1	0.04	–0.02	0.02	–0.001
4	350	924	25	54	5	2	1.0	1	0.9	1	0.04	0.3
		Поступление с атмосферными выпадениями (лето)										
1	550	101	3	2	7	3	2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2
1	450	82	2	1	5	3	1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1
2	450	82	2	1	5	3	1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1
2	350	64	2	1	4	2	1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1
3	450	82	2	1	5	3	1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1
4	350	64	2	1	4	2	1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1
		Поступление с атмосферными выпадениями (осень)										
1	550	31	0.8	0.5	2.1	1.0	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1	450	26	0.7	0.4	2	1	0.4	0.04	0.04	0.1	0.1	0.04
2	450	26	0.7	0.4	2	1	0.4	0.04	0.04	0.1	0.1	0.04
2	350	20	0.5	0.3	1	0.7	0.3	0.03	0.03	0.1	0.1	0.03
3	450	26	0.7	0.4	2	1	0.4	0.04	0.04	0.1	0.1	0.04
4	350	20	0.5	0.3	1	0.7	0.3	0.03	0.03	0.1	0.1	0.03

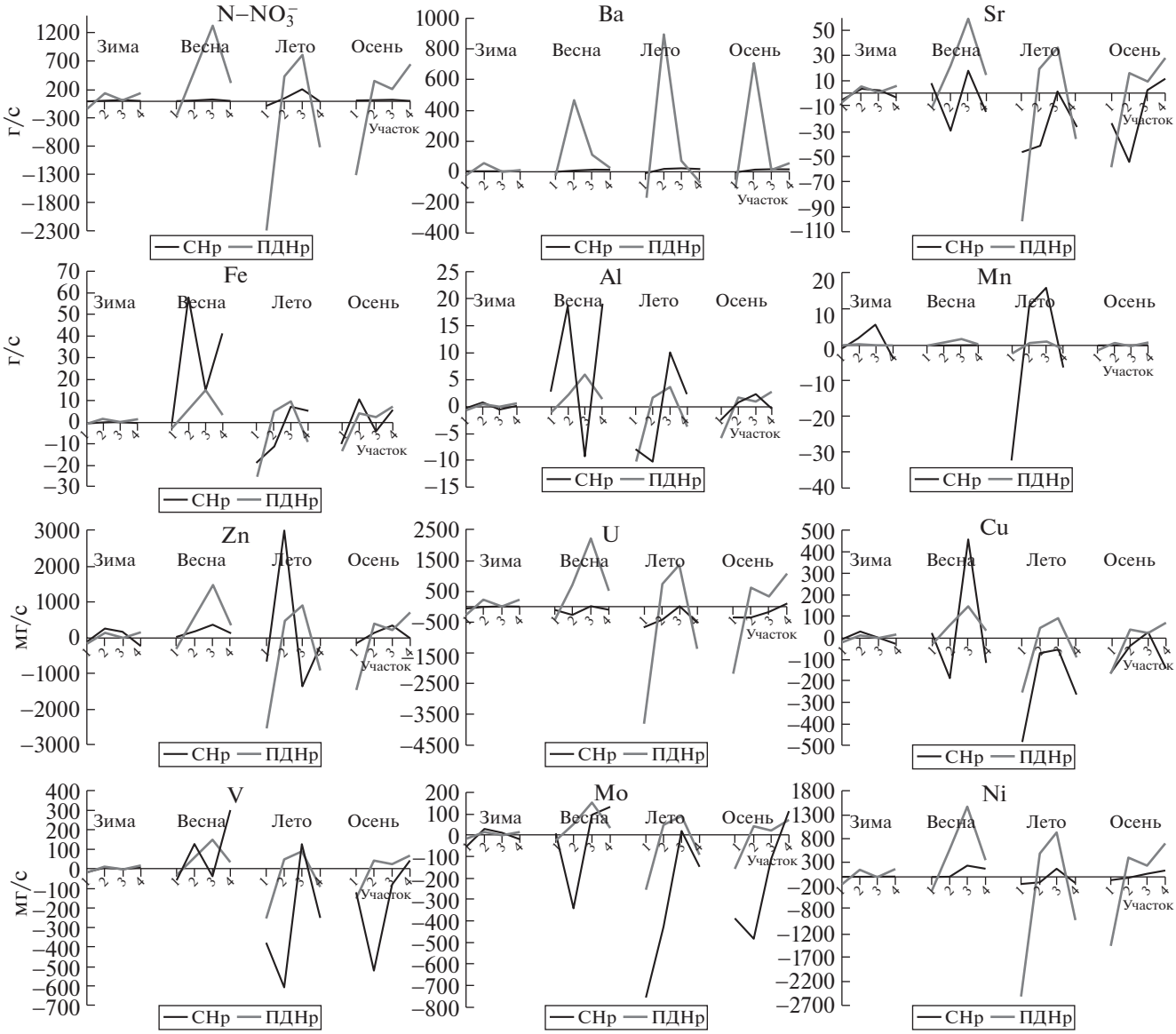

Рис. 2. Пространственно-временные закономерности распределения величин современных ($СН_Р$) и предельно допустимых ($ПДН_Р$) нагрузок загрязнителей на речную экосистему.

значения $СН_Р$) – на загрязненных участках *2* и *3* летом и осенью (рис. 2). По-видимому, это связано с наложением природных процессов высвобождения химических элементов на техногенные в теплый период. Амплитуда колебаний величин $СН_Р$ зависит от биофильности и кларка элемента: чем больше его содержание в живом веществе и земной коре, тем выше амплитуда [13]. Наибольшей амплитудой характеризуется N: летом $СН_Р$ азота колеблется от – 100 г/с на участке *1* до 200 г/с на участке *3*. Значительно меньшей амплитудой характеризуются Fe, Al, Sr, Ba и Mn: величины их современной нагрузки летом и осенью находятся в пределах от –50 до 50 г/с. На порядок меньшей амплитудой характеризуется Zn: от –1.5 до 3 г/с. Наименьшая амплитуда типична для U, V, Ni, Cu и Mo: от –600 до 300 мг/с.

Направленность корреляции величин современной и допустимой нагрузок и их знак (+/–), являются признаками, указывающим на наличие/отсутствие загрязнения и на механизм его поступления/ассимиляции. Совпадение положительных пиков $ПДН_Р$ и $СН_Р$ означает поступление загрязнителя со стоком, совпадение отрицательных – его потери со стоком, положительная $ПДН_Р$ при отрицательной $СН_Р$ означает ассимиляцию, отрицательная $ПДН_Р$ при положительной $СН_Р$ – загрязнение либо артефакт. Зимой у большинства элементов наблюдается совпадение положительных пиков $ПДН_Р$ и $СН_Р$ на участках ре-

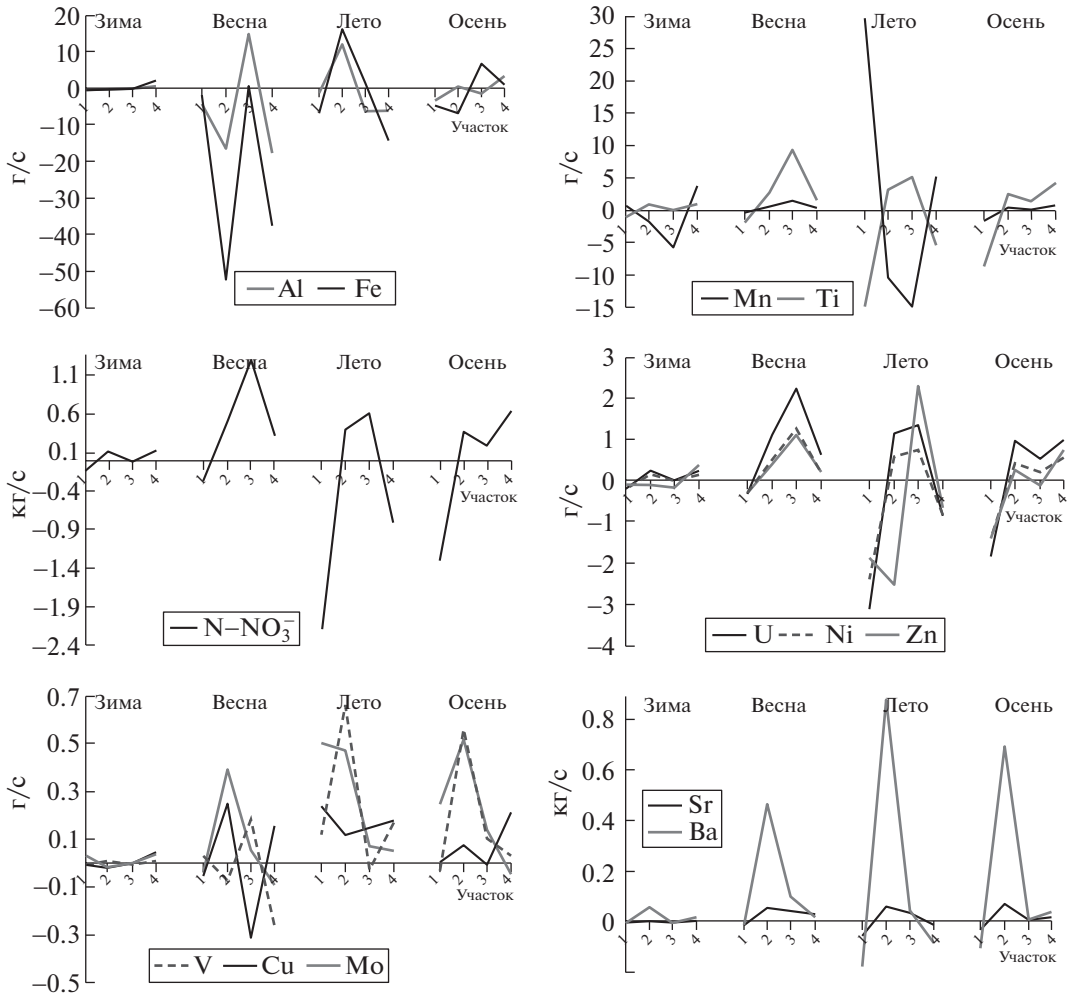

Рис. 3. Пространственно-временные закономерности распределения величин остатков лимитов загрязнителей речной экосистемы (ОЛЗ$_Р$).

ки *1* и *2*, сменяющееся положительными пиками ПДН$_Р$ при отрицательных СН$_Р$ на участках *3* и *4* (рис. 2). При низком уровне антропогенной нагрузки зимой смена загрязнения ассимиляцией вниз по течению объясняется увеличением времени пребывания воды в русле и, как следствие, реализацией процессов самоочищения. В остальные сезоны направленность корреляции величин ПДН$_Р$ и СН$_Р$ зависит от наличия загрязнения. Например, соответствие положительных пиков ПДН$_Р$ у N, Sr, Ba, Cu, Ni, U отрицательным пикам СН$_Р$ на участках *2* и *4* свидетельствует об ассимиляции, а совпадение положительных пиков ПДН$_Р$ и СН$_Р$ на участках *1* и *3* – о загрязнении. Четкая зависимость между ПДН$_Р$ и СН$_Р$ отсутствует у Al, Fe, Mn, Ti и V. Как тенденции можно отметить: 1) положительную корреляцию между ПДН$_Р$ и СН$_Р$ с весны по осень в верхнем течении, 2) отрицательную корреляцию ПДН$_Р$ и СН$_Р$ весной и осенью, а также положительную корреляцию ПДН$_Р$ и СН$_Р$ летом в нижнем течении. Отсутствие ассимиляции загрязнителей в верхнем течении обусловлено естественными причинами – высокими концентрациями металлов в воде и малым временем водообмена. Отсутствие ассимиляции в нижнем течении летом свидетельствует об интенсивном загрязнении вод этими металлами [14].

Остаток лимита загрязнителя, с одной стороны, зависит от его ПДК: чем она выше, тем выше ОЛЗ$_Р$. С другой стороны, ОЛЗ$_Р$ зависит от современной концентрации загрязнителя, величина которой, помимо загрязнения, обусловлена кларком элемента: чем он выше, тем ниже ОЛЗ$_Р$. Преимущественно отрицательные величины ОЛЗ$_Р$ характерны для Al, Fe, Mn и Ti (рис. 3). У Al и Fe минимальные значения ОЛЗ$_Р$ наблюдаются весной, что говорит об их приуроченности к поверхностному стоку и техногенном происхождении, а у Mn и Ti – летом и зимой, что свидетельствует о поступлении с подземным стоком и природном

Таблица 2. Остаток лимита загрязнения (ОЛЗ$_Г$) геосистем, кг/км^2 × 3 мес.

Участок №	Осадки, мм	$N\text{-}NO_3^-$	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	U	Ni	Zn	V	Cu
		Лето										
1	550	–317	–8	–20	–7	–4	1	–0.5	–0.4	–1	–0.3	–0.1
1	450	–298	–8	–19	–6	–3	2	–0.4	–0.4	–0.5	–0.3	–0.1
2	450	10	9	157	–3	0.3	–2	0.07	–0.02	–1	–0.1	–0.1
2	350	28	9	157	–2	1	–2	0.10	0.01	–1	–0.1	–0.1
3	450	66	5	9	–7	–2	–4	0.15	0.03	0.3	–0.3	–0.1
4	350	–1220	–16	–125	–13	–23	7	–1	–1	–1	0.03	0.2
		Осень										
1	550	–159	–4	–11	–2	–2	–1	–0.2	–0.2	–0.2	–0.1	–0.05
1	450	–154	–4	–11	–2	–1	–0.5	–0.2	–0.2	–0.2	–0.1	–0.04
2	450	60	12	125	–1	–2	1	0.1	0.04	0.1	0.03	–0.03
2	350	66	12	125	–1	–2	1	0.1	0.1	0.1	0.05	–0.02
3	450	34	1	0.1	–2	1	1	0.1	0.01	0.0	–0.1	–0.03
4	350	921	24	53	4	1	2	1	1	1	–0.01	0.3
		Зима										
1	550	–29	–0.6	–1	–1	–0.6	–0.1	–0.05	–0.04	–0.1	–0.1	–0.03
1	450	–26	–0.5	–1.4	–0.9	–0.5	–0.05	–0.04	–0.04	–0.04	–0.04	–0.02
2	450	29	0.1	10	–0.8	–0.4	0.6	0.02	0.02	0.03	–0.03	–0.02
2	350	32	0	10	–1	–0.3	0.6	0.02	0.02	0.04	–0.02	–0.02
3	450	2	–0.8	–0.6	–0.7	–0.4	–0.5	–0.02	–0.01	0.001	–0.03	–0.01
4	350	193	14	13	0.3	3	6	0.3	0.2	0.6	–0.01	0.1
		Весна										
1	550	–39	–2	–2	–1	–0.7	–0.2	–0.1	–0.1	–0.1	–0.1	–0.03
1	450	–36	–2.2	–2.2	–1.3	–0.6	–0.1	–0.1	–0.05	–0.1	–0.04	–0.03
2	450	98	9	83	–3.7	–9.8	1	0.2	0.1	0.1	–0.04	0.02
2	350	101	9	83	–4	–10	1	0.2	0.1	0.1	–0.03	0.03
3	450	281	8	21	2	–0.3	1	0.4	0.3	0.3	0.004	–0.1
4	350	482	41	23	–27	–55	1	1	0.3	0.4	–0.4	0.2
		Год										
1	550	–543	–15	–35	–12	–7	1	–0.8	–0.7	–0.9	–0.53	–0.25
1	450	–513	–14	–34	–10	–6	1	–0.8	–0.6	–0.8	–0.43	–0.20
2	450	122	30	374	–10	–12	–4	0.4	0.1	–0.8	–0.24	–0.14
2	350	152	31	375	–8	–11	–3	0.5	0.1	–0.7	–0.14	–0.09
3	450	383	14	29	–7	–2	–3	0.6	0.3	0.5	–0.35	–0.21
4	350	376	63	–36	–36	–74	16	1.3	0.0	0.9	–0.40	0.72

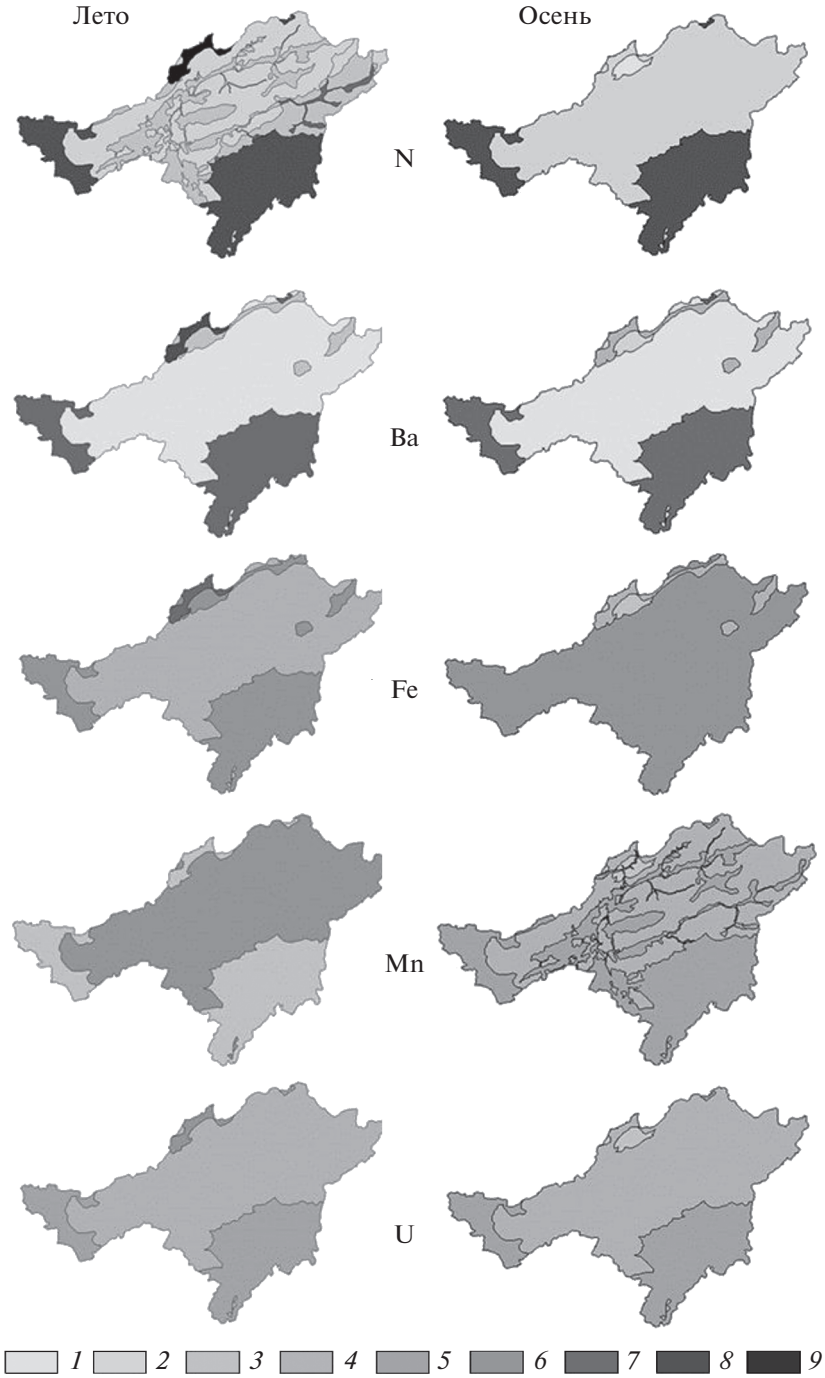

Рис. 4. Пространственно-временные закономерности распределения величин остатков лимитов загрязнителей (N, Ba, Fe, Mn, U) геосистем ($ОЛЗ_Г$) бассейна р. Селенги, кг/км^2·3 мес: (*1*) 100–1000; (*2*) 10–100; (*3*) 1–10; (*4*) 0 –1; (*5*) –1–0; (*6*) –10...–1; (*7*) –100...–10; (*8*) –1000...–100; (*9*) <–1000.

происхождении. Чередование отрицательных и положительных величин $ОЛЗ_Р$ характерно для N, V, Cu, Mo, U, Ni и Zn, что свидетельствует о существовании как природных, так и антропогенных источников. Отрицательные величины $ОЛЗ_Р$ на участках *1* и *3* наблюдаются у N, U, Ni и Zn зимой и осенью, а у V, Cu и Mo – в течение всего года. На участке *1* они обусловлены природными источниками, на участке *3* – антропогенными. Положительные величины $ОЛЗ_Р$ этих же элементов в упомянутые сезоны на участках *2* и *4* обусловлены ассимиляцией загрязнителей. Ассимиляцией обусловлены и положительные величины $ОЛЗ_Р$, наблюдаемые у N, U, Ni и Zn на участке *3* весной и летом. Преимущественно положительные величины $ОЛЗ_Р$ типичны для Sr и Ba и объясняются их

незначительным содержанием в антропогенных выбросах и сбросах.

Величина допустимой нагрузки загрязнителя на геосистему в значительной степени зависит от величины $ОЛЗ_Р$. На сезонное распределение величин $ОЛЗ_Г$ влияет количество осадков: летом и осенью, когда выпадает бóльшая часть годовой нормы, диапазоны $ОЛЗ_Г$ у большинства элементов шире, чем зимой и весной (табл. 2). Величины $ОЛЗ_Г$ и их диапазон также зависят от биофильности элемента: чем она выше, тем больше $ОЛЗ_Г$ и разница между залесенными и незалесенными территориями (рис. 4). Наибольшие диапазоны и величины характерны для N, Ba, Sr, наименьшие – для Zn, V, Cu (табл. 2). Отрицательные величины $ОЛЗ_Г$ (табл. 2) при отрицательных величинах $ОЛЗ_Р$ (табл. 1), наблюдаемые у Al и Fe, говорят об их высвобождении в почвах в результате выветривания.

Естественно, расчет нагрузок Al и Fe (как и некоторых других элементов) на геосистемы не имеет смысла. Просто для иллюстрации результатов расчетов выбирались элементы с наибольшими диапазонами и высокой контрастностью пространственного распределения величин $ОЛЗ_Г$. В дальнейшем эти результаты можно будет интерпретировать с точки зрения почвенных процессов.

Наименьшая устойчивость геосистем к загрязнению наблюдается на участках бассейна *1* и *4* (рис. 4): в первом случае она обусловлена бóльшим количеством осадков, во втором – отсутствием отчуждения загрязнителя с древесиной. Также устойчивость в отношении ряда элементов (Al, Fe, Mn) падает в месте наибольшего загрязнения – на участке *3* (табл. 2). Устойчивость экосистем в отношении этих же элементов падает с уменьшением отношения длина русла/площадь бассейна вниз по течению.

Полученные результаты подтверждают правомочность использованного подхода. Его особенностью является возможность расчета нагрузок для отдельных участков реки и ее бассейна в любые периоды времени. Для расширения возможностей метода необходимы исследования, направленные на выявление механизмов самоочищения водных экосистем.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование осуществлено в рамках проектов №№ 0345–2019–0008 (АААА–А16–116122110065–4), 0347–2019–0003 (АААА–А17–117041910172–4) при поддержке Правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований – гранты 17–45–388054 (анализ и обработка данных) и 17–29–05068, 20–45–380013 (химический анализ и картирование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Berlin, Federal Environmental Agency. 2004. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4038/dokumente/manual_complete_english.pdf .
2. *Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов (Учебное пособие). М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
3. *Semenov M.Y., Semenov Y.M., Silaev A.V., et al.* Assessing the Self-purification Capacity of Surface Waters in Lake Baikal Watershed // Water. 2019. V. 11. № 7. P. 1505. https://doi.org/10.3390/w11071505
4. *Гагаринова О.В.* Устойчивость природных вод бассейна оз. Байкал к антропогенным воздействиям // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 46–54.
5. ГОСТ 17.1.1.01–77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Термины и определения. http://www.allsnips.info/docs/4/4711/index.htm.
6. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. М.: Управление водных ресурсов МПР России, 2004. 65 с. http://www.publicecology.ru/publojs-314-2.html.
7. *Хажеева З.И., Плюснин А.М.* Режим растворенных газов и органического вещества в реках бассейна р. Селенга // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 1. С. 70–82. https://doi.org/10.7868/S0321059613010045
8. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552. http://www.consultant.ru.
9. *Щербенко Т.А., Копцик Г.Н., Гроненберг Б.-Я. и др.* Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2008. № 2. С. 9–16.
10. *Пунцукова С.Д.* Лесные ресурсы бассейна реки Селенги // География и природные ресурсы. 2010. № 4. С. 62–68.
11. *Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В. и др.* Загрязнение снега на акватории оз. Байкал и прилегающей территории // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 340–353. https://doi.org/10.7868/S032105961703004X
12. *Максютова Е.В., Бардаш А.В.* Среднегодовое количество осадков // Экологический атлас Байкальского региона / Отв. ред.: Батуев А.Р., Корытный Л.М., Хмельнов А.Е. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2017. С. 20.
13. *Перельман А.И.* / Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
14. *Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В. и др.* Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 5. С. 613–631.

ADJOINT EVALUATION OF ALLOWABLE CONTAMINANT LOADS TO FRESHWATER AND TERRESTRIAL ECOSYSTEMS (ON EXAMPLE OF SELENGA RIVER BASIN)

M. Yu. Semenov[a,#], Corresponding Member of the RAS V. A. Snytko[b], A. V. Silaev[c], and Yu. M. Semenov[c]

[a] *Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russian Federation*

[b] *S.N. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation*

[c] *V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: smu@mail.ru*

An approach to the related assessment of the values of allowable loads of pollutants on riverive and terrestrial ecosystems is proposed. The approach is based on estimating the rate of removal (assimilation) or inflow of the pollutant by the difference in its mass flow rate in the lower and upper gauging stations of the selected river section. This rate was considered as a value of the modern pollutant load on the river ecosystem (ML_R). The maximum allowable inflow of pollutant between the stations, calculated on the basis of the maximum-allowable pollutant concentration (MAC), was considered as the maximum allowable load (MAL_R). The difference between the MAL_R and the ML_R was considered as the remainder of the river ecosystem pollution limit or as an allowable load. The rate of atmospheric deposition of the pollutant was seen as a modern pollutant load on the geosystem (ML_G). The sum of the rate of pollutant removal due to forest harvesting and the rate of assimilation/inflow of the pollutant in the river, divided by square of drained part of watershed, was considered to be the maximum allowable load (MAL_G). The difference between the MAL_G and the ML_G was considered as the limit of the pollution of the terrestrial ecosystem or as a allowable load.

Keywords: allowable loads, contaminants, freshwater ecosystems, self-purification, geosystem