



УДК 504.058, 504.064.2.001.18

DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-1-80-88

**ОЦЕНКА ЗАИЛЕНИЯ РЕК БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ****EVALUATION OF SILTATION OF THE BELGOROD OBLAST RIVERS****О.В. Спесивый<sup>1</sup>, Я.В. Павлюк<sup>2</sup>, Н.С. Полумордвинов<sup>2</sup>  
O.V. Spesivyy<sup>1</sup>, Ya.V. Pavlyuk<sup>2</sup>, N.S. Polumordvinov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85<sup>1</sup> N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, 54 A Staryh Bolshevikov St, Voronezh, 394064, Russia<sup>2</sup> Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: pavlyuk@bsu.edu.ru

**Аннотация**

В статье описана авторская методика оценки заиления рек на основе расчета соотношения стока речных наносов и транспортирующей способности водотоков. Представлена формула для расчета транспортирующей способности потока в зависимости от расходов воды, базирующаяся на общепринятых методах гидравлики. Анализ и прогнозирование динамики речного стока позволили разработать модель транспортирующей способности водотоков в зависимости от водности года. Интегрированы современные представления об эрозионно-аккумулятивных процессах с дистанционными методами анализа рельефа, что позволило оценить объем поступающих наносов с водосбора в его замыкающий створ. Результаты расчета экологической напряженности на водосборах показали, что в реках Белгородской области преобладают процессы заиления. Созданные карты риска заиления водотоков двух периодов времени (маловодный год и при норме стока) позволяют проиллюстрировать пространственно-временные закономерности изменения ситуации на водосборах в зависимости от климатических условий.

**Abstract**

A possibility of assessing the risk of silting-up of rivers by calculating the sediment transport and then comparing the sediment transporting capacity and sediment-production rate has been shown. A formula for calculating the sediment transporting capacity in relation to river flow, based on conventional hydraulics is presented. Analysis and forecasting of the dynamics of river flow allowed to develop a model of transport capacity of watercourses depending on the water content of the year. Modern representations of erosion-accumulation processes with remote relief analysis methods are integrated, which allowed estimating the amount of incoming sediment from the catchment to its closing point. The results of the calculation of the ecological tension in the catchment areas showed that the silting processes prevail in the rivers of the Belgorod region. The created risk maps for siltation of watercourses of two periods of time (low-water year and with a run-off rate) allow illustrating the spatio-temporal patterns of the situation change at catchments depending on climatic conditions.

**Ключевые слова:** транспортирующая способность, эрозия, заиление, коэффициент доставки наносов, речные бассейны, сток, русло.

**Keywords:** sediment transporting capacity, erosion, silting, sediment load ratio, river basins, runoff, riverbed.

## Введение

Значимость эрозионно-аккумулятивных процессов в трансформации агроландшафтов осознана давно, но подходы к количественной оценке перераспределения наносов на пути от приводораздельных частей обрабатываемых склонов до устья речной сети разработаны только в последние десятилетия, благодаря расширению методической базы исследований.

Весь огромный объем почвенного материала, который смывается со склонов и перераспределяется в верхней части флювиальных систем, а затем выносится из оврагов, распределяется на нижних частях склонов, в конусах выноса оврагов, в днищах ложбин, а также поступает на поймы и в русла ручьев и рек разных размеров. Речная сеть водосбора является дистрибутивной системой [Weissmann et al., 2015; Чеботарев и др., 2011; Щербинина, Слесивый, 2015], которая перераспределяет осадочный материал и формирует геоморфологические элементы современных бассейнов. Ключевым моментом при пространственно-временном исследовании перераспределения наносов на обширных территориях является оценка динамики изменений среднего слоя денудации во времени и его соотношение со средним слоем аккумуляции в долинах верхних звеньев флювиальной сети [Yermolaev, Golosov et al., 2014]. Перераспределение наносов в эрозионно-русловой сети определяется характером баланса наносов в эрозионно-аккумулятивном комплексе «склон – ложбина – овраг – балка – ручей – река – дельта». Наносы, которые транспортируются реками (W), складываются из двух составляющих: бассейновой и русловой. Наносы бассейнового происхождения поступают в реки вследствие развития эрозионных (склоновой, линейной эрозии) и других денудационных процессов в пределах речного водосбора. При этом они в большей мере формируют сток взвешенных наносов. В случае пересыщения потока происходит осаждение наносов и заиление русла.

## Объекты и методы исследования

Орографические особенности территории Белгородской области благоприятствуют изучению механизмов формирования речного стока. В ее западной и центральной части находится орографически выраженный субширотный пояс зарождения крупных рек, включая трансграничные. Таким образом, экологическая ситуация на данной территории практически не зависит от экологических проблем смежных областей, но она существенно влияет на функционирование водных артерий ниже по течению [Лисецкий и др., 2015].

Автором изучен годовой сток по восьми створам рек V порядка с площадью водосбора ( $F$ ) менее  $800 \text{ км}^2$  и VI порядка ( $1200 \text{ км}^2 < F < 9000 \text{ км}^2$ ). Продолжительность рядов наблюдений стока охватывает периоды с 1930 по 2012 гг., величина средней квадратической ошибки не превышает 10% ( $3\% < \sigma_{\text{нп}} < 7\%$ ), коэффициент вариации не превышает 0.5 ( $0.22 \leq Cv \leq 0.5$ ), ошибка коэффициента изменчивости по методу моментов находится в пределах 8–10.5%. Результаты расчетных гидрологических характеристик указывают на репрезентативность изучаемых периодов формирования стока рек. Для основных и малых рек Белгородской области были рассчитаны величины транспортирующей способности: для основной артерии г. Белгорода реки Везёлка и значительно преобразованной горнодобывающей промышленностью – р. Осколец.

Главным критерием устойчивости малых рек по отношению к заилению является их транспортирующая способность (ТС). Имеющиеся в литературе рекомендации по расчету ТС потока можно разделить на три группы. К первой принадлежит большое количество работ, в которых предлагаются эмпирические формулы (см. обзор [Замарин, 1951]). Они по большей части получены в результате изучения гидравлики и режима наносов в лабораторных лотках.

Объем поступления наносов, их состав и крупность зависят от многих природных факторов. Все это делает русловой процесс сложным многофакторным явлением. Многие исследователи пытались объяснить распределение наносов с точки зрения совокупного



влияния морфометрических, климатических и гидрологических показателей водосборных бассейнов. Эти отношения часто были представлены в виде одной или нескольких моделей регрессии иностранными авторами [Pinet & Souriau, 1988; Summerfield & Hulton, 1994; Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000; Aalto et al., 2006; Yan et al., 2011; Shi et al., 2014; Einstein, 1950; Dragoun, 1962]. Глобальная постановка вопроса об оценке стока речных наносов предпринята Г. Флемингом [Fleming, 1969]. Анализ методов оценки стока наносов можно найти в докладе R.J. Wasson [2002] на конференции «Modelling erosion, sediment transport and sediment yield» (UNESCO, Paris).

Большинство эмпирических формул после некоторых преобразований можно привести к виду:

$$S_{cp} = k \cdot \frac{U^m}{H^n \cdot \omega^a},$$

где  $S_{cp}$  – средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности;  $U$  – скорость потока;  $\omega$  – средняя гидравлическая крупность наносов, находимая по заданному гранулометрическому составу наносов при учете процентного содержания фракций;  $H$  – глубина потока; численные значения показателей степени  $n$ ,  $a$  определяются по эмпирическим данным.

Довольно широко применяются в практике расчетов транспортирующей способности потоков эмпирические формулы Замарина, полученные на основании обработки данных полевых исследований среднеазиатских каналов. В свое время эти формулы были рекомендованы в качестве [ГОСТ 3908–47].

В проведенном нами исследовании необходимо было, в первую очередь, установить особенности и различия перераспределения наносов для рек, которые протекают в условиях однородности и изотропности поля годового стока. Для расчетов использовали формулу Е.А. Замарина [Замарин, 1951], которая была калибрована по данным о транспортирующей способности потоков с обычными для малых рек наносами (алевритовыми и мелкопесчаными) [Беркович, Сидорчук, 1996; Бутаков и др., 1996]:

$$R = 0.022 \cdot Q \cdot \left(\frac{U}{\omega}\right)^{1.5} \cdot \sqrt{HI} \quad (1)$$

где  $R$  – транспортирующая способность потока, кг/с;  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $U$  – скорость течения, м/с;  $\omega$  – гидравлическая крупность, формула справедлива в диапазоне 0.002–0.008 м/с;  $H$  – глубина потока, м;  $I$  – уклон, %.

На основании обработки большого гидрометрического материала были получены [Нежиховский, 1971] следующие гидролого-морфометрические зависимости для рек длиной >10 км:

$$B = 14.8 \cdot Q^{0.51} \quad (2)$$

$$H = 0.8 \cdot Q^{0.25} \quad (3)$$

$$I = A_3 / F^{0.35} \quad (4)$$

где  $B$  – ширина русла, м;  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>; параметр  $A_3$  составляет 0.0036 для холмистых равнин.

Принимая во внимание, что

$$U = Q / (B \cdot H) \quad (5)$$

путем преобразований (1) на основании (2–5) нами была получена следующая формула для расчета транспортирующей способности потока (кг/с):

$$R = \frac{0.001188 \cdot Q^{1.485}}{40.74 \cdot \omega^{1.5} \cdot F^{0.175}} \quad (6)$$

Естественный поток обладает возможностью в широких пределах изменять свою транспортирующую способность в зависимости от режима, количества и состава поступающих наносов, путем регулирования изменений продольного уклона на участке реки и морфологического строения русла и поймы, в том числе за счет формы поперечного сечения русла (изменения соотношения ширины и глубины русла, что приводит к изменению типа руслового процесса).

Расчет отношения транспортирующей способности малой реки в створе к стоку наносов, который поступает в реку со склонов бассейна, является критерием уязвимости рек по отношению к заилению в условиях антропогенной нагрузки и ускоренной эрозии на водосборах.

С увеличением объема промежуточных коллекторов уменьшается доля наносов, достигающих замыкающего створа, т. е. уменьшается коэффициент доставки наносов  $D_r$  (Delivery Ratio). Зная коэффициент доставки и объем сноса вещества с территории  $i$ -го водосбора, можно оценить величину стока наносов в его замыкающем створе:

$$W_{di} = W_{yi} \cdot D_{ri}, \quad (7)$$

где  $W_{di}$  – величина стока наносов в замыкающем створе, т/год с км<sup>2</sup>;  $W_{yi}$  – объём сноса вещества с территории  $i$ -го водосбора, т/год с км<sup>2</sup>;  $D_{ri}$  – коэффициент доставки наносов.

Получена [Голосов, 2006] эмпирическая связь коэффициента доставки наносов ( $D_{ri}$ ) и площади водосбора ( $F$ ).

$$D_{ri} = 0.65 \cdot F^{-0.27}. \quad (8)$$

Объем сноса вещества с территории водосбора можно определить путем расчета величины смыва почвы по бассейнам с помощью ГИС-технологий и ДДЗ. В данном исследовании использовали универсальное уравнение потерь почвы (USLE) [Wischmeier, Smith, 1978]. В качестве показателей  $C$  и  $P$  факторов использовано значение нормализованного вегетационного индекса (NDVI) [Marinina et al., 2016]. С помощью инструментов зональной статистики в ArcGIS был рассчитан среднегодовой смыв по бассейнам. На его основе с помощью инструментов математической статистики ArcGIS и формулы (7) получен сток наносов в замыкающем створе. Для моделирования процессов заиления водотоков нами были проведены расчеты транспортирующей способности рек для самого маловодного года (1975 г.), для наиболее многоводного года (1981 г.), для нормы стока исследуемых рек, на период оценки смыва почв (2010 г. – средний по водности год). Прогнозирование динамики стока рек Белгородской области до 2020 г. выполнено с помощью нейронных сетей по методике [Lisetskii et al., 2014]. Полученные данные использованы для прогнозирования заиления рек в 2020 г.

### Результаты и их обсуждение

Результаты расчета транспортирующей способности основных рек представлено в таблице 1.

Представлены результаты расчетов при  $\omega = 0.002$  м/с. Для более крупных наносов транспортирующая способность рек меньше полученной и не представляет интереса для расчетов.

Закономерно, что наибольшей транспортирующей способностью обладают реки с высоким расходом воды, т.е. чем больше река, тем большим потенциалом переноса наносов она обладает. Ученые сообщают о различиях в стоке наносов при разных расходах воды в 60% и более [Phillips et al., 1999; Спесивый, 2013]. Транспортирующая способность русловых потоков в случае увеличения объема стока возрастает в большей степени. Для дальнейшей интерпретации результатов расход наносов был переведен в модуль стока наносов ( $M$ , т/год с км<sup>2</sup>). Полученные результаты (табл. 2) показали, что



модуль стока наносов малых рек ( $M$ ) в многоводный год превышает величину маловодного года в среднем в 6 раз.

Таблица 1

Table 1

Основные параметры для расчета транспортирующей способности основных рек Белгородской области ( $F$  в км<sup>2</sup>,  $Q$  в м/с,  $R$  в кг/с)  
The main parameters for the calculation of the transporting capacity of the Belgorod Oblast rivers ( $F$  in km<sup>2</sup>,  $Q$  in m/s,  $R$  in kg/s)

Показатели	Река							
	Ворскла	Везёлка	Северский Донец	Тихая Сосна	Оскол (истоки)	Осколец	Оскол (нижнее течение)	Валуй
$F$	1870	394	740	2972	1540	494	8640	1290
$Q_1$	2.23	0.34	1.02	2.00	3.71	1.20	14.4	1.78
$R_1$	0.29	0.02	0.11	0.23	0.63	0.14	3.50	0.22
$Q_2$	10.8	2.18	4.23	10.6	7.47	3.5	46.7	5.51
$R_2$	2.99	0.36	0.87	2.68	1.79	0.71	20.1	1.17
$Q_3$	5.78	1.00	2.60	6.10	6.10	1.90	28.60	0.25
$R_3$	1.18	0.11	0.42	1.17	1.32	0.29	9.71	0.55
$Q_4$	4.75	0.33	1.43	5.38	4.2	1.23	25.1	0.25
$R_4$	0.88	0.02	0.17	0.98	0.76	0.15	8.00	0.53
$Q_5$	7.50	0.18	3.91	6.52	4.27	0.73	29.35	1.90
$R_5$	1.74	0.01	0.78	1.30	0.77	0.07	10.09	0.24

Примечание (здесь и далее). Индексы у показателей: 1 – маловодный год; 2 – многоводный год; 3 – норма стока; 4 – 2010 г.; 5 – 2020 г. (прогноз).

Таблица 2

Table 2

Модуль стока наносов основных рек Белгородской области ( $M$ , т/год с км<sup>2</sup>)  
Sediment runoff module of the rivers of Belgorod Oblast ( $M$ , t/year from km<sup>2</sup>)

Показатели	Ворскла	Везёлка	Северский Донец	Тихая Сосна	Оскол (истоки)	Осколец	Оскол (нижнее течение)	Валуй
$M_1$	4.84	1.85	4.50	2.30	12.95	9.22	12.79	5.36
$M_2$	50.38	29.17	37.22	28.43	36.61	45.17	73.38	28.69
$M_3$	19.91	9.17	18.07	12.36	27.10	18.23	35.43	13.4
$M_4$	14.88	1.77	7.44	10.39	15.57	9.56	29.19	12.86
$M_5$	29.32	0.72	33.12	13.82	15.93	4.41	36.82	5.90

Внутригодовое распределение стока наносов, так же как и стока воды, на всех реках крайне неравномерно. Больше всего наносов (во многие годы до 90–95% годовой величины) формируется и проходит в весенние месяцы. Наименьший сток наносов характерен для сентября–октября.

С помощью инструментов зональной статистики в ArcGIS был рассчитан среднегодовой смыв по бассейнам Белгородской области, после чего по формуле (8) с применением пространственной статистики получен расчетный сток наносов в замыкающем створе. Сток влекомых наносов не учитывали из-за отсутствия систематических наблюдений на большинстве гидрологических постов.



Критерием уязвимости малых рек по отношению к заилению в условиях антропогенной нагрузки и ускоренной эрозии на водосборах является их относительная транспортирующая способность (ОТС) – отношение транспортирующей способности реки в данном створе к стоку наносов, поступающему в реку со всего водосбора. Нами было рассчитано значение этого показателя в каждом створе. С помощью интерполяции (методом обратно взвешенных расстояний) значений ОТС по территории области в среде ГИС, нами были получены карты риска заиления водотоков двух периодов времени – маловодный год (как период наибольшей уязвимости рек) и при норме стока. Результаты расчета ОТС представлено в таблице 3 и на рисунке.

Таблица 3  
Table 3

Оценка заиления рек Белгородской области  
Assessment of the siltation of the rivers of Belgorod Oblast

Показатели	Ворскла	Везёлка	Северский Донец	Тихая Сосна	р. Оскол (истоки)	Осколец	р. Оскол (нижнее)	Валуй
Dr	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03
Wd	22.25	40.59	34.77	24.92	27.94	31.06	17.50	31.46
M1	4.84	1.85	4.50	2.39	12.95	9.22	12.79	5.36
ОТС1	0.22	0.05	0.13	0.10	0.46	0.30	0.73	0.17
M2	50.38	29.17	37.22	28.43	36.61	45.17	73.38	28.69
ОТС2	2.26	0.72	1.07	1.14	1.31	1.45	4.19	0.91
M3	19.91	9.17	18.07	12.36	27.10	18.23	35.43	13.40
ОТС3	0.89	0.23	0.52	0.50	0.97	0.59	2.03	0.43
M4	14.88	1.77	7.44	10.39	15.57	9.56	29.17	12.86
ОТС4	0.67	0.04	0.21	0.42	0.56	0.31	1.67	0.41
M5	29.32	0.72	33.12	13.82	15.93	4.41	36.82	5.90
ОТС5	1.32	0.02	0.95	0.55	0.57	0.14	2.10	0.19

Величина стока наносов с км<sup>2</sup> ( $W_d$ ) максимальна для бассейна малой реки Везёлки, немного меньше приходится на бассейны Северского Донца, Оскольца и Валуй. Меньшее количество наносов приходится на истоки Оскола, бассейны Тихой Сосны и Ворсклы. Наименьшие значения этого показателя характерны для нижнего течения Оскола.

Расчеты ОТС показали, что в реках Белгородской области преобладают процессы заиления. При норме стока, в период средней водности потоков, процессы очищения от наносов характерны только для самой многоводной реки области – Оскола. Транспортирующая способность этой реки преобладает над количеством привносимых в нее наносов, исключая наиболее маловодный период. Анализ полученной карты показал, что значения ОТС сильно меняются в зависимости от водности года. Наибольшей уязвимостью к заилению обладают верховья исследуемых рек. Анализ таблицы позволяет определить, что в наиболее многоводный год для рек характерно очищение русла от наносов, только реки Везёлка и Валуй продолжают заиливаться (в р. Валуй ситуация приближается к балансу прихода наносов и транспортирующей способности потока). Полученный прогноз расходов воды в 2020 г. также позволяет предсказывать преобладание процессов заиления во всех исследуемых реках, кроме нижнего течения р. Оскол и Ворсклы. Изменение среднегодовых расходов воды в р. Оскол подчиняется естественным закономерностям [Lisetskii et al., 2014], что говорит о несущественном влиянии антропогенной нагрузки на гидрологический режим реки.

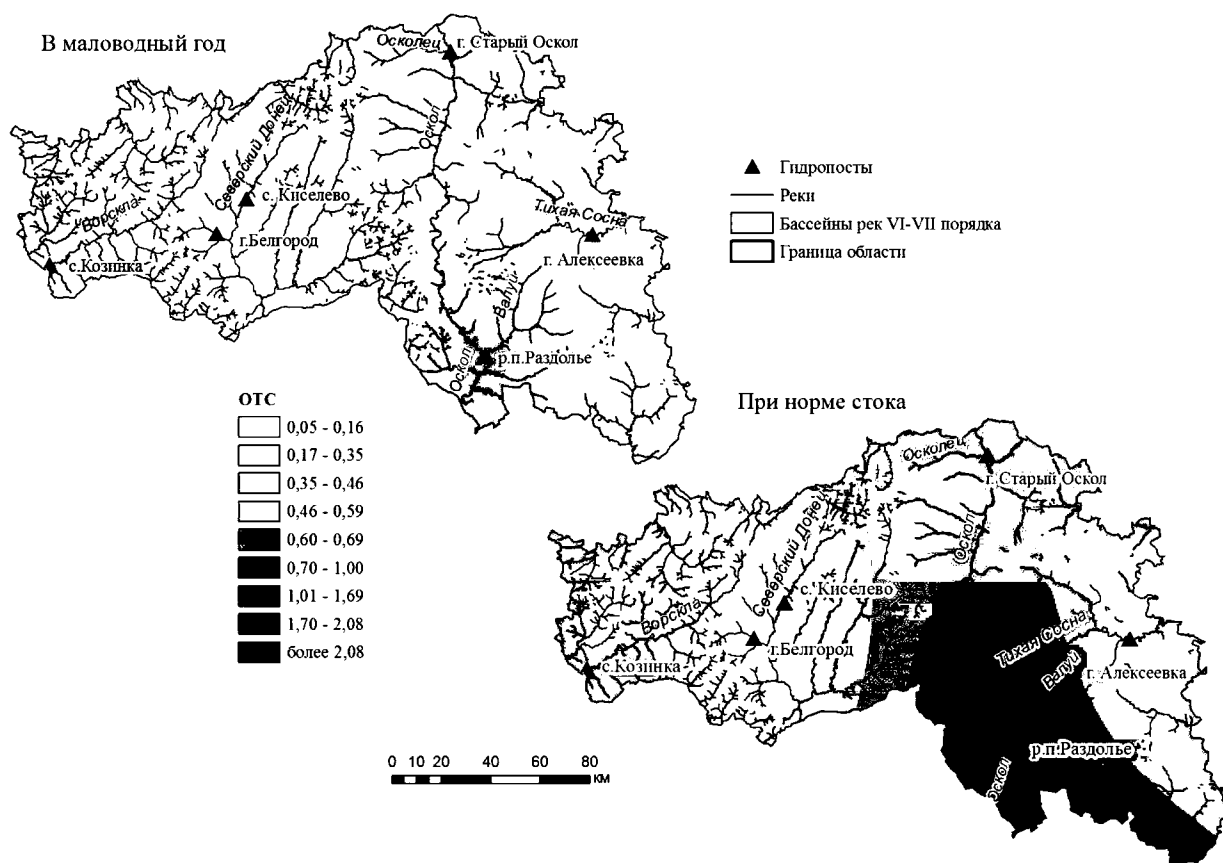


Рис. Оценка относительной транспортирующей способности рек Белгородской области  
Fig. Estimation of the relative transporting capacity of the Belgorod Region rivers

Для других бассейнов характерно преобладание процессов аккумуляции наносов. Самая неблагоприятная картина складывается в бассейне Везёлки, где сток наносов в замыкающем створе во много раз превышает транспортирующую способность реки при разных вариантах водности. Валуй, Северский Донец и Тихая Сосна также являются нестабильными речными системами, со значительным эффектом аккумуляции наносов при различных вариантах водности. Моделирование ОТС Оскольца показало незначительное преобладание процессов аккумуляции наносов от процессов очищения от них. Однако антропогенная нагрузка в пределах зоны горнодобывающей промышленности изменила водный режим реки таким образом, что прогноз на 2020 г. выводит данный водоем на второе место по уязвимости к процессам заиления. Ворскла является наименее уязвимой речной системой. Для истоков Оскола характерно вариабильность ОТС от изменения объема стока воды, что типично для малых рек. Также, на истоки Оскола следует обратить внимание, учитывая объем стока наносов в этом бассейне и прогнозируемую ситуацию на 2020 г.

### Заключение

Полученные результаты являются одним из вариантов развития событий. Следует учитывать, что при переводе расхода наносов (кг/с) в модуль стока наносов (т/га в год) результаты значительно усредняются. Сток наносов рассчитывался исходя из смыва почвы, значения которого получены на основе уравнения, где один из показателей (фактор растительности) рассчитан на период максимальной степени проективного покрытия почвы. Таким образом, следует предположить, что в другие периоды времени смыв почвы будет значительно превосходить полученные значения. Однако, для нашего исследования важно определить риск заиления водоемов при наиболее благоприятных условиях.

Нами разработана методика оценки заиления рек на основе расчета соотношения стока речных наносов и транспортирующей способности водотоков, базирующаяся на общепринятых методах гидравлики, современных представлениях об эрозионно-аккумулятивных процессах и дистанционных методах анализа рельефа, позволяющая моделировать и прогнозировать экологическую напряженность на водосборах в зависимости от динамики речного стока.

Полученный прогноз заиления рек в 2020 г., наряду с динамикой их гидрологического режима и установленными закономерностями функционирования бассейнов [Lisetskii et al., 2014], дифференцирует прогнозируемую ситуацию по развитию деградационных процессов в зависимости от порядка речных систем и природно-хозяйственной обстановки в их бассейнах. Это позволяет наметить поэтапный план оздоровления гидроэкологической ситуации в бассейнах основных рек Белгородской области с учетом уязвимости речных систем к процессам заиления.

### Благодарности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16–35–00226 мол\_а.*

### Список литературы

#### References

1. Беркович К.М., Сидорчук А.Ю. 1996. Оценка устойчивости русел рек Европейской России и ее оценка в связи с антропогенными нагрузками на реки и их бассейны. *В кн.: Проблемы оценки экологической напряженности Европейской территории России: факторы, районирование, последствия.* М.: 77–87.

Berkovich K.M., Sidorchuk A.Yu. 1996. Evaluation of the stability of river beds in European Russia and its assessment in connection with anthropogenic pressures on rivers and their basins. *In: Problemy otsenki ekologicheskoy napryazhennosti Evropeyskoy territorii Rossii: faktory, rayonirovanie, posledstviya* [Problems of assessing the ecological tension in the European territory of Russia: factors, regionalization, consequences]. Moscow: 77–87. (in Russian)

2. Бутаков Г.П., Дедков А.П., Кичигин А.Н., Мозжерин В.И., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. 1996. Малые реки как наиболее уязвимое звено речной сети. *В кн.: Эрозионные и русловые процессы.* Вып. 2. М.: 56–70.

Butakov G.P., Dedkov A.P., Kichigin A.N., Mozzherin V.I., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. 1996. Small rivers as the most vulnerable link in the river network. *In: Erozionnye i ruslovye protsessy* [Erosion and channel processes]. Vol. 2. Moscow: 56–70. (in Russian)

3. Голосов В.Н. 2006. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. Москва, 296.

Golosov V.N. 2006. Erozionno-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin [Erosion and deposition processes in the river basins of cultivated plains]. Moscow, 296. (in Russian)

4. Замарин Е.А. 1951. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. М.–Л., 82.

Zamarin E.A. 1951. Transportiruyushchaya sposobnost' i dopuskaemye skorosti techeniya v kanalakh [Conveying capacity and permissible flow rate in the channels]. Moscow–Leningrad, 82. (in Russian)

5. Нежиховский Р.А. 1971. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока вод: методические основы и практика прогнозов паводочного стока рек. Ленинград, 476.

Nezhikhovskiy R.A. 1971. Ruslovaya set' basseyna i protsess formirovaniya stoka vod: metodicheskie osnovy i praktika prognozov pavodochnogo stoka rek [Channel network of the basin and the process of formation of the flow of water: the methodological foundations and practice of forecasts of the river flow]. Leningrad, 476. (in Russian)

6. Лисецкий Ф.Н., Дегтярь А.В., Буряк Ж.А., Павлюк Я.В., Нарожняя А.Г., Землякова А.В., Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, 362.

Liseckij F.N., Degtjar' A.V., Burjak Zh.A., Pavljuk Ja.V., Narozhnjaja A.G., Zemljakova A.V., Marinina O.A. 2015. Reki i vodnye ob#ekty Belogor'ja [Rivers and Water Bodies of Belogorie]. Belgorod, 362. (in Russian)

7. ГОСТ 3908-47. Транспортирующая способность и незаиляющие скорости течения воды в каналах (рекомендуемый). Дата введения 28.06.1965.





- GOST 3908-47. Transporting capacity and non-breaking speed of water flow in canals (recommended). Date of introduction 28.06.1965. (in Russian)
8. Спесивый О.В. 2013. Структурно-функциональный анализ водосборных бассейнов Центрально-Черноземного региона для целей рационального природопользования. *Современные проблемы науки и образования*, 6: 949.
- Spesivy O.V. 2013. Structural-functional analysis of the hydrographic basins of the Central Chernozem region for the purposes of rational use of nature. *Modern problems of science and education*, 6: 949.
9. Чеботарев П.М., Спесивый О.В., Ахтырцев А.Б. 2011. Трансформация деградационных процессов на землях Воронежской области в последние десятилетия. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 1: 173–178.
- Chebotarev P.M., Spesivyy O.V., Akhtirtsev A.B. 2011. Land degradation on the territory of the Voronezh region and the main trends in the process of its transformation in recent decades. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 1: 173-178.
10. Щербинина С.В., Спесивый О.В. 2015. Роль бассейнового подхода для целей организации сельскохозяйственного природопользования и водоохранных мероприятий. *Вестник Воронежского государственного университета. География. Геоэкология*, 4: 66–76.
- Shcherbinina S.V., Spesivyy O.V. 2015. The role of river basin approach for the organization of agricultural nature management and water protection measures. *Proceedings of Voronezh State University. Geography. Geoecology*, 4: 66–76.
11. Aalto R., Dunne T., Guyot J.-L. 2006. Geomorphic controls on Andean denudation rates. *Journal of Geology*, 114 (1): 85–99.
12. Dragoun F.J. 1962. Rainfall energy as related to sediment yield. *Journal of Geophysical Research*, 67 (4): 1495–1501.
13. Einstein H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington, U.S. Dept. of Agriculture, 71.
14. Harrison C.G. 2000. What factor control mechanical erosion rates? *International Journal of Earth Sciences*, 88 (4): 752–763.
15. Fleming G. 1969. Design curves for suspended load estimation. In: Proc. Inst. Civil Engrs. 43: 1–9.
16. Lisetskii F.N., Pavlyuk Ya.V., Kirilenko Zh.A., Pichura V.I. 2014. Basin organization of nature management for solving hydroecological problems. *Journal Russian Meteorology and Hydrology*, 39 (8): 550–557.
17. Ludwig W., Probst J.J. 1998. River sediment discharge to the oceans: present controls and Tyazhelye metally v pochvax i rasteniyax global budgets. *American Journal of Science*, 298 (4): 265–Mikroelementy v pochvax SSSR 295.
18. Marinina O.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Lisetskii F.N., Pavlyuk Ya.V. 2016. Evaluation of Siltation of Rivers with Intensive Economic Development of Watersheds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (14): 3004–3013.
19. Phillips J.M., Webb B.W., Walling D.E., Leeks G.J.L. 1999. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes*, 13 (7): 1035–1050.
20. Pinet P., Souriau M. 1988. Continental erosion and largescale relief. *Tectonics*, 7 (3): 563–582.
21. Shi Z.H., Huang X.D., Ai L., Fang N.F., Wu G.L. 2014. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds. *Geomorphology*, 226: 193–201.
22. Summerfield M.A., Hulton N.J. 1994. Natural controls of fluvial denudation in major world drainage basins. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 99 (B7): 13871–13883.
23. Wasson R.J. 2002. What approach to the modelling of catchment scale erosion and sediment transport should be adopted? In: Modelling erosion, sediment transport and sediment yield: a contribution to IHP-V projects 2.1 and 6.2. Paris: 1–11.
24. Weissmann G.S., Hartley A.J., Scuderi L.A., Nichol G.J., Owen A., Wright S., Felicia A.L., Holland F., Anaya F.M.L. 2015. Fluvial geomorphic elements in modern sedimentary basins and their potential preservation in the rock record. *Geomorphology*, 250: 187–219.
25. Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. In: Agriculture Handbook U.S. Department of Agriculture. Washington: 537–543.
26. Yan Y.X., Wang S.J., Chen J.F. 2011. Spatial patterns of scale effect on specific sediment yield in the Yangtze River Basin. *Geomorphology*, 130 (1–2): 29–39.
27. Yermolaev O.P., Golosov V.N., Kumani M.V., Litvin L.F., Rysin I.I., Dvinskikh A.P. 2015. Recent changes in sediment redistribution in the upper parts of the fluvial system of European Russia: Regional aspects. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 367: 333–339.