

РЕЖИМ НАНОСОВ В Р. ХУАНХЭ И ИХ АККУМУЛЯЦИЯ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Э. И. Михневич¹, доктор технических наук
Ли Цзэмин^{1,2}, аспирант

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

²Шэньянский технологический институт, г. Фушунь, Китай

Аннотация

Река Хуанхэ – важнейший источник воды, подаваемой на орошение. Однако в ней отмечается очень высокая концентрация взвешенных наносов, среднемноголетнее значение которой составляет порядка 30 кг/м³. Для обеспечения гарантированной подачи воды на ирригационные системы, нормальной работы магистральных каналов требуется снижение мутности потока в реке. Для определения необходимой степени ее снижения изучен режим наносов в реке, предложена методика расчета транспортирующей способности взвесенасыщенного потока, установлены корреляционные связи между годовым стоком, содержанием наносов в речном потоке, проходящем через створы реки, в которых расположены гидрологические станции. Транспорт наносов в нижнем створе реки тесно связан с годовым стоком воды, содержанием наносов в потоке, проходящем через верхнюю станцию. Дана оценка аккумулирующей способности водохранилища Сяоланди, методика определения объемов и сроков его заиления.

Ключевые слова: режим наносов, русловые процессы, транспортирующая способность потока, незаиляющая скорость, аккумуляция наносов, заиление водохранилища.

Abstract

E. I. Mikhnevich, Li Zemin

SEDIMENT REGIME IN THE YELLOW RIVER AND ITS ACCUMULATION IN RESERVOIRS

The Yellow Rive (Huang He) is the most important source of water supplied for irrigation. However, it has a very high concentration of suspended sediment, the long-term average value of which is about 30 kg/m³. To ensure a guaranteed supply of water to irrigation systems and normal operation of main canals, a reduction in the turbidity of the flow in the river is required. To determine the required degree of its reduction, the sediment regime in the river was studied, a methodology was proposed for calculating the transport capacity of a suspended saturated flow, and correlations were established between the annual runoff and sediment content in the river flow passing through the river sections in which hydrological stations are located. Sediment transport in the lower section of the river is closely related to the annual water flow and sediment content in the flow passing through the upper station. An assessment of the storage capacity of the Xiaolandi reservoir and a method for determining the volume and timing of its siltation are given.

Keywords: sediment regime, channel processes, transporting capacity of the flow, non-silting speed; sediment accumulation, siltation of the reservoir.

Введение

Река Хуанхэ – важнейший поверхностный водный ресурс Китая, который широко используется для гидроэнергетики, водоснабжения, подачи воды на ирригационные системы, расположенные, главным образом, в среднем и нижнем течении реки. Развитие экономики Китая неотделимо от водного источника этой реки. Тем не менее Хуанхэ признана одной из самых сложных рек в мире по управлению водным потоком и борьбе с наводнениями. Одна из отличительных особенностей р. Хуанхэ заключается в том, что среди больших рек мира она имеет самую высокую концентрацию взвешенных наносов, среднемноголетнее значение которой составляет порядка

30 кг/м³, а в период высоких паводков может достигать на отдельных участках 300 кг/м³ [1, 2]. Все это оказывает существенное влияние на развитие русловых процессов, вызывающих активное меандрирование речного русла и его интенсивное заиление, особенно в нижнем течении реки, где скорости течения воды снижаются до 0,4–0,5 м/с.

Общая длина Хуанхэ составляет 5464 км. В верхнем течении русло пролегает по крутым скалистым склонам, где скорости достигают 5 м/с и более. В среднем течении, с выходом реки на равнину Хэтао, река образует большую излучину, протекая сначала в северном направлении, затем в восточном и, наконец,

поворачивает на юг, где со скоростью порядка 1,5–2,0 м/с пересекает лессовое плато Шен-си, интенсивно его эродировывает и насыщается огромным количеством лессовидных наносов. При выходе реки на Великую Китайскую равнину скорости течения уменьшаются до 0,4–0,5 м/с, транспортирующая способность потока резко снижается и наносы отлагаются в русле в огромном количестве. Дно русла повышается и на участке реки большой протяженности (примерно 800 км) располагается на 3–10 м выше прилегающей низменности («висячая река»). Это вызывает угрозу опасных наводнений, для защиты от которых русла Хуанхэ и ее притоков ограждены дамбами высотой 5–12 м общей протяженностью около 5000 км, в том числе 1324 км дамб и 1498 км бережных по обоим берегам реки.

В течение длительного времени Китай упорно работал над управлением русловым процессом на р. Хуанхэ и контролем баланса воды и наносов в ней. Объем транспортируемых по реке наносов сократился с 1,6 млрд тонн в 2001 г. до 300 млн тонн в 2017 г., но это по-прежнему самый высокий показатель в мире [3]. На протяжении многих лет ученые из разных стран проводили исследования процессов эрозии и заиления русла в нижнем течении Хуанхэ. Эти исследования в основном

представляли теоретический анализ, создание математической модели речной эрозии и заиления, установление соответствующих взаимосвязей, что стало несомненным вкладом в теорию транспорта наносов [1, 3]. Однако практически основным мероприятием по снижению содержания наносов в речном потоке остается аккумуляция их в водохранилищах и прудах-отстойниках. В последние годы, в связи с вводом в эксплуатацию многих центров охраны водных ресурсов в среднем и верхнем течении р. Хуанхэ и водохранилища Сяоланди, процессы, связанные с воздействием водных потоков на прилегающие территории и транспортом наносов в реке, несколько стабилизировались [4].

Воды Хуанхэ широко используются для орошения (на равнине Хэтао и Большой Китайской равнине). Для обеспечения гарантированной подачи воды на ирригационные системы, нормальной работы магистральных каналов очень важно изучить наносный режим реки, оценить аккумулялирующую способность водохранилищ, созданных на реке, предложить методику расчета транспортирующей способности взвесенасыщенного потока, определения объемов и сроков заиления водохранилища, меры по улучшению водного режима реки и реконструкции водохранилищ.

Режим стока воды и наносов в нижнем течении р. Хуанхэ

Наиболее интенсивному заилению подвержен участок русла в нижнем течении Хуанхэ, который начинается от водохранилища Сяоланди на западе до устья моря на востоке и имеет длину 865 км. Здесь расположен ряд гидрологических станций: Сяоланди, Хуаюанькоу, Цзяхэйтан, Гаоцунь, Сункоу, Айшан, Луокоу, Лиджин (рис. 1).

Река Хуанхэ в среднем течении имеет ширину 300–500 м и становится более просторной в нижнем течении, где достигает 1500 м. Уклон дна реки более крутой в верхнем течении и более пологий в нижнем. Перепад на нижнем участке длиной 865 км составляет 94 м, соответственно, среднее значение уклона $i = 0,00011$; площадь водосборного бассейна на этом участке – около 23 000 км².

В течение длительного времени большое количество наносов переносилось с верхнего и среднего участков реки в ее нижнее течение, что привело к практически полному

заилению русла, в результате чего образовалась так называемая надземная висячая река (рис. 2), дно русла которой стало выше уровня прибрежной территории [5].

На основе данных, опубликованных в Бюллетене речных наносов Китая в течение ряда лет после завершения строительства водохранилища Сяоланди, проведен анализ режима воды и наносов в низовье р. Хуанхэ, установлены корреляционные связи между стоком воды и расходом наносов.

Участки между гидрологическими станциями Сяоланди – Хуаюанькоу и Хуаюанькоу – Гаоцунь являются типичными участками меандрирующих рек, между станциями Гаоцунь – Айшан – переходными участками, а между Айшан – Лиджин – извилистыми участками рек. Створы пяти контрольных гидрологических станций – это узлы, разделяющие реку на характерные участки (табл. 1) [6].



Рис. 1. Характерные участки реки и гидрологические станции в нижнем течении р. Хуанхэ



Рис. 2. Надземная висячая река в нижнем течении р. Хуанхэ

Таблица 1. Характерные участки р. Хуанхэ и типы руслового процесса в ее нижнем течении

Участок реки	Длина участка, км	Ширина поймы реки, км	Ширина русла по верху, км	Средняя ширина русла, км	Средний продольный уклон	Тип руслового процесса
Сяоланди – Хуаюанькоу	125,8	4–9	1–3	1,4	0,00023	Меандрирующий
Хуаюанькоу – Гаоцунь	177,9	5–20	1,6–3,5	1,37	0,00018	Меандрирующий
Гаоцунь – Айшан	182,1	1–8,5	0,5–1,6	0,73	0,000115	Переходный
Айшан – Лиджин	269,6	0,4–5	0,4–1,2	0,65	0,0001	Извилистый
Ниже Лиджина	110	–	–	–	–	Эстуарий

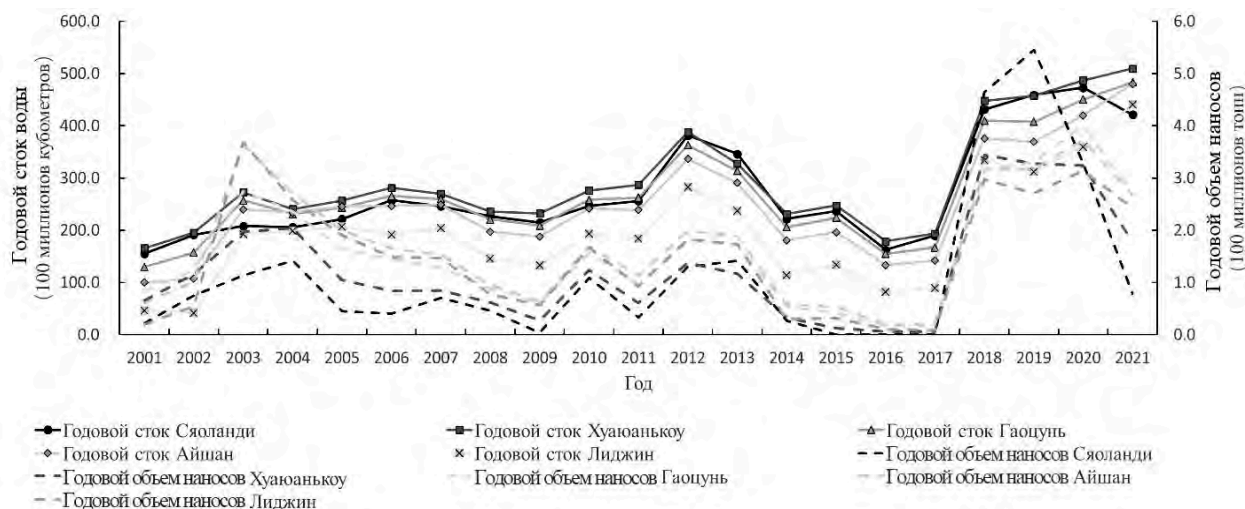


Рис. 3. Изменения стока воды и наносов в нижнем течении р. Хуанхэ в 2001–2021 гг.

Ежегодные изменения годового стока воды и наносов в период 2001–2021 гг. на пяти контрольных гидрологических станциях (Сяоланди, Хуаюанькоу, Гаоцунь, Айтшан и Лиджин) в нижнем течении р. Хуанхэ показаны на рис. 3.

Как видно из рис. 3, после строительства водохранилища Сяоланди (2001 г.) количество транспортируемых наносов через створы гидрологических станций, расположенных ниже по течению, значительно снизилось, достигнув самого низкого значения в 2015 г. и 2016 г., в соответствии с тенденцией изменения стока. Однако после 2017 г. количество наносов, транспортируемых через створы всех станций, резко увеличилось. Это отражает то, что аккумулирующая способность водохранилища Сяоланди достигла критического значения и оно стало не в состоянии задерживать наносы. Для восстановления аккумулирующей способности водохранилища требуется его очистка или интенсивная промывка со сбросом наносов в нижний бьеф.

Ситуация с переносом наносов на определенном участке р. Хуанхэ связана не только с годовым стоком воды, но и с содержанием наносов в верхнем течении. Эта зависимость может быть выражена следующей формулой [7]:

$$Q_s = K S_{\text{вверх}}^{\alpha} Q^{\beta}, \quad (1)$$

где Q_s – расход транспортируемых наносов в створе исследуемой станции; K – коэффициент пропорциональности; $S_{\text{вверх}}$ – количество наносов, поступающих из верхней станции;

Q – среднегодовой расход воды в створе исследуемой станции; α, β – индексы степени.

Из формулы (1) видно, что объем транспортируемых наносов тесно связан с измеренным годовым стоком воды на исследуемой гидрологической станции, который соответственно тесно связан с годовым стоком воды в створе верхней станции. Произведение годового стока воды и концентрации наносов в поступающем потоке представляет собой объем транспортируемых наносов через данное поперечное сечение, поэтому формулу (1) можно представить в виде следующей зависимости:

$$Q_s = f(Q_{\text{вверх}}, S_{\text{вверх}}, Q_{s, \text{вверх}}), \quad (2)$$

где $Q_{\text{вверх}}$ – среднегодовой расход воды в створе вышерасположенной гидрологической станции; $Q_{s, \text{вверх}}$ – расход наносов, транспортируемых через створ данной гидрологической станции. В этой формуле Q_s относится к расходу наносов, транспортируемых через створ станции, расположенной ниже на данном участке реки.

Из вышеприведенного соотношения можно вывести характерные зависимости переноса воды и наносов на четырех участках р. Хуанхэ. Годовой сток воды от Сяоланди до станции Лиджин выражается в терминах от Q_1 до Q_5 ; перенос наносов – в терминах от Q_{S1} до Q_{S5} ; содержание наносов в потоке – обозначениями от S_1 до S_5 . Когда известен годовое количество Q_1 , содержание речных наносов S_1 или ежегодный

перенос песка Q_{S1} из водохранилища Сяоланди, то можно рассчитать пропускную способность станции, расположенной ниже, для транспортировки наносов по соответствующей формуле. Корреляционные связи между объемом транспортируемых наносов через створ нижней стан-

ции и годовым стоком воды, содержанием наносов в потоке и расходом транспортируемых наносов на станции, расположенной выше, устанавливаются отдельно для каждого рассматриваемого участка. Эти связи систематизированы и представлены в табл. 2–4.

Таблица 2. Корреляционные связи между расходом наносов через нижнюю гидрологическую станцию и среднегодовым расходом воды в створе вышерасположенной станции

Участок реки	Адекватная формула	Коэффициент корреляции r
Сяоланди – Хуаюанькоу	$Q_{S2} = 0,00004Q_1^2 - 0,015Q_1 + 2,28$	0,820
Хуаюанькоу – Гаоцунь	$Q_{S3} = -0,000002Q_2^2 + 0,0102Q_2 - 1,191$	0,827
Гаоцунь – Айшан	$Q_{S4} = -0,00002Q_3^2 + 0,0185Q_3 - 1,987$	0,790
Айшан – Лиджин	$Q_{S5} = -0,00002Q_4^2 + 0,0201Q_4 - 1,995$	0,796

Таблица 3. Взаимосвязь между расходом наносов через нижнюю гидрологическую станцию и содержанием наносов в потоке на выше расположенной станции

Участок реки	Адекватная формула	Коэффициент корреляции r
Сяоланди – Хуаюанькоу	$Q_{S2} = -0,0076S_1^2 + 0,3735S_1 + 0,1345$	0,940
Хуаюанькоу – Гаоцунь	$Q_{S3} = -0,0162S_2^2 + 0,5012S_2 + 0,0108$	0,848
Гаоцунь – Айшан	$Q_{S4} = -0,00009S_3^2 + 0,3398S_3 - 0,1823$	0,836
Айшан – Лиджин	$Q_{S5} = -0,0066S_4^2 + 0,3686S_4 - 0,5429$	0,808

Таблица 4. Взаимосвязь между расходом наносов через нижнюю и верхнюю станции

Участок реки	Адекватная формула	Коэффициент корреляции r
Сяоланди – Хуаюанькоу	$Q_{S2} = -0,144Q_{S1}^2 + 1,364Q_{S1} + 0,1755$	0,964
Хуаюанькоу – Гаоцунь	$Q_{S3} = -0,1529Q_{S2}^2 + 1,5292Q_{S2} + 0,0899$	0,976
Гаоцунь – Айшан	$Q_{S4} = -0,1005Q_{S3}^2 + 1,3946Q_{S3} - 0,1617$	0,981
Айшан – Лиджин	$Q_{S5} = -0,0322Q_{S4}^2 + 1,1034Q_{S4} - 0,2457$	0,990

Как видно из табл. 2, после завершения строительства водохранилища Сяоланди объем переноса наносов через станцию рассматриваемого речного участка, расположенную ниже, имеет определенную взаимосвязь с годовым объемом стока воды верхней станции, но распределение точек относительно разбросано и коэффициент корреляции соответствующей формулы для каждого речного участка составляет порядка 0,8.

Как показывают данные табл. 3, для нижнего течения р. Хуанхэ существует определенная корреляционная связь между расходом

наносов, транспортируемых через нижнюю гидрологическую станцию, и содержанием наносов в потоке в створе вышерасположенной станции. Наиболее тесная корреляционная связь имеет место для участка Сяоланди – Хуаюанькоу, где коэффициент корреляции в соответствующей формуле достигает 0,94. По мере удаления гидрологических станций от водохранилища Сяоланди значения коэффициента корреляции несколько уменьшаются.

Как следует из данных табл. 4, расход наносов, транспортируемых через нижнюю гидрологическую станцию, тесно связано с рас-

ходом наносов, транспортируемых в створе вышерасположенной станции. Коэффициент корреляции между этими значениями на каждом участке р. Хуанхэ превышает 0,95, причем корреляция постепенно увеличивается вниз по течению, а на участке Айшан – Лиджин коэффициент корреляции достигает 0,99.

Для определения транспортирующей способности потока S , кг/м³ может быть использована разработанная ранее нами [8, 9] формула:

$$S = \frac{v^3 (\rho_s - \rho_b) \cdot 10^{-3}}{\alpha \eta R g u} \quad (3)$$

Соответственно, величину незаилающей скорости $v_{нез}$, м/с, при которой не будет происходить осаждение взвешенных наносов, можно определять по формуле

$$v_{нез} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \eta S R g u}{(\rho_s - \rho_b) \cdot 10^{-3}}}, \quad (4)$$

где S – средневзвешенная мутность потока, кг/м³;

η – коэффициент неоднородности взвешенных наносов, $\eta = d_{90} / d_{50}$ (d_{90} – диаметр частиц крупной фракции, которых содержится в составе наносов менее 90 % по массе, m ; d_{50} – средний диаметр частиц наносов, m);

R – гидравлический радиус живого сечения, m ;

u – гидравлическая крупность частиц средневзвешенного диаметра, m/c ;

ρ_s, ρ_b – плотность соответственно частиц наносов и воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

α – коэффициент, зависящий от характера осаждения наносов; принимается $\alpha = 4,0$ при $d = 0,1-2,5$ мм; $\alpha = 4,5$ при $d > 2,5$ мм и $\alpha = 3,5$ при $d < 0,1$ мм.

Если окажется, что $v < v_{нез}$, то будет происходить осаждение наносов и заиливание русла.

Аккумуляция наносов в водохранилище Сяоланди

Для обеспечения гарантированной подачи воды из р. Хуанхэ на орошение и осветления взвесенесущего потока, поступающего в магистральные каналы, создают водохранилища, чаще всего многофункционального назначения [10], в том числе для аккумуляции наносов. На Хуанхэ функционирует самое крупное водохранилище – Сяоланди. Оно имеет многоцелевое назначение: для целей гидроэнергетики (мощность ГЭС – 1836 МВт), промышлен-

В потоках, сильно насыщенных наносами, что характерно для р. Хуанхэ, плотность смеси воды с наносами $\rho_{см}$ несколько выше плотности чистой воды ρ_b , поэтому в формулах (3) и (4) более правильно принимать плотность двухфазного потока $\rho_{см}$, которая может быть определена следующим равенством:

$$\rho_{см} = v_n \rho_n + (1 - v_n) \rho_b, \quad (5)$$

$$\text{или} \quad \rho_{см} = \rho_b + v_n (\rho_n - \rho_b), \quad (6)$$

где v_n – объем наносов (в плотном теле), содержащихся в 1 м³ двухфазного потока;

$(1 - v_n)$ – объем чистой воды в 1 м³ двухфазного потока;

ρ_n – плотность частиц наносов, кг/м³ (для песчаных грунтов среднее значение $\rho_n = 2650$ кг/м³).

Значение v_n может быть представлено в виде соотношения

$$v_n = S / \rho_n. \quad (7)$$

Подставляя это значение v_n в уравнение (6), получим:

$$\rho_{см} = \rho_b + S \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_n} \right). \quad (8)$$

Расчеты, выполненные по формуле (3), показали, что в среднем течении воды (скорость $v = 2$ м/с; наносы средней крупности частиц $d = 0,05$ мм; гидравлическая крупность $u = 0,00195$ м/с; коэффициент неоднородности взвешенных наносов $\eta = 2$; $\rho_{см} = 1018,4$ кг/м³; гидравлический радиус $R = 3$ м) транспортирующая способность потока составила $S = 31$ кг/м³, что соответствует фактическому содержанию наносов в потоке на данном участке. В нижнем течении реки, где средняя скорость $v = 0,5$ м/с; $R = 4$ м, транспортирующая способность потока резко снижается и составляет только $S = 0,37$ кг/м³. Поэтому на этом участке происходит интенсивное осаждение наносов, заиливание русла и повышение отметки дна, образуя так называемую висячую реку [5].

ного и сельскохозяйственного водоснабжения, защиты от наводнений, аккумуляции наносов и подачи осветленной воды на ирригационные системы. Высота плотины – 154 м, длина – 1317 м. Площадь водной поверхности водохранилища – 272 км², общая емкость – 12,65 млрд м³, мертвый объем $V_{мо}$ составляет 7,55 млрд м³.

После завершения строительства водохранилища Сяоланди оно активно использо-

валось для аккумуляции наносов и проблема заиления русла в нижнем течении реки была в определенной степени решена: заиление значительно уменьшилось, русло реки в низовьях Хуанхэ сузилось, уровень воды понизился [4], ситуация с «нависающей рекой» улучшилась [5]. Однако эта проблема стала актуальной после того, как емкость водохранилища Сяоланди, предназначенная для аккумуляции наносов, заполнилась.

Для определения объема и срока заиления мертвого объема водохранилища можно использовать полученную нами ранее формулу, предназначенную для расчета объема наносов [10]:

$$V_H = 31,54 t_{cl} \left(S \bar{Q}_{год} \frac{1-\delta}{\rho_{взв}} + \frac{q_{вл} B}{\rho_{вл}} \right) \varphi, \text{ млн м}^3, \quad (9)$$

где 31,54 – продолжительность года, млн с; t_{cl} – срок службы водохранилища, лет; S – среднесуточная мутность воды, кг/м³; $\bar{Q}_{год}$ – среднесуточный расход воды, м³/с; δ – транзитная часть взвешенных наносов, выносимых в нижний бьеф, принимается в среднем $\delta = 0,20-0,30$, соответственно $(1 - \delta)$ – та часть наносов, которая отложится в водохранилище; $\rho_{взв}$ – плотность взвешенных наносов: в среднем 1100–1500 кг/м³; $q_{вл}$ – расход влекомых (донных) наносов на единицу ширины русла, кг/(с · м); B – ширина русла по дну, соответствующая среднесуточному годовому расходу $\bar{Q}_{год}$, м; расход влекомых наносов для всего русла будет $q_{вл} B$; $\rho_{вл}$ – плотность донных наносов (в среднем 1400–1600 кг/м³); φ – коэффициент, учитывающий дополнительное поступление наносов за счет разрушения берегов, а также склоновой и ветровой эрозии.

Для рек, несущих большое количество мелкозернистых и пылеватых взвешенных наносов, расход влекомых (донных) наносов небольшой (порядка 1–3 % от взвешенных). Для р. Хуанхэ этот расход составляет менее 1 % [2]. Такое же небольшое количество донных наносов в реке получено в результате расчета по формуле, приведенной в нашей статье [10]:

$$q_{вл} = 0,011 h_r \frac{v^{3,9}}{(gh)^{1,45}}, \quad (10)$$

где h_r – высота гряд, которую Б. Ф. Снищенко [2] рекомендует принимать $h_r = 0,25h$ при глубине потока $h < 1$ м и $h_r = 0,20 + 0,1 h$ при

$h \geq 1$ м; v – скорость потока, м/с; g – ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/с².

Из формулы (9) можно рассчитать срок заиления мертвого объема водохранилища:

$$t_{cl} = V_H / [31,54 \left(S \bar{Q}_{год} \frac{1-\delta}{\rho_{взв}} + \frac{q_{вл} B}{\rho_{вл}} \right) \varphi]. \quad (11)$$

Исходя из объема заиления, равного мертвому объему водохранилища, $V_H = V_{мо} = 7,55$ млрд м³, при годовой среднесуточной концентрации (мутности) наносов в р. Хуанхэ $S = 30$ кг/м³, срок заиления мертвого объема водохранилища Сяоланди, рассчитанный по формуле (11), составил 16 лет, что близко к фактическому сроку аккумуляции наносов в мертвом объеме водоема. Для восстановления аккумуляционной способности водохранилища требуется его очистка или интенсивная промывка на первом этапе.

Учитывая, что не все поступающие в водохранилище взвешенные наносы аккумулируются, а часть их – порядка одной четверти ($\delta = 0,25$) – выносятся в нижний бьеф, в речном потоке ниже водохранилища Сяоланди могут содержаться наносы в количестве 7,5 кг/м³. Чтобы не допустить заиление магистральных каналов и обеспечить гарантированную подачу воды на ирригационные системы, скорость течения воды v в каналах должна быть выше незаилающей скорости $v_{нез}$, которую можно определять по формуле (4). В нашем случае при среднем диаметре частиц наносов $d = 0,05$ мм и, соответственно, их гидравлической крупности частиц $u = 0,00195$ м/с значение незаилающей скорости $v_{нез}$ составляет 0,8 м/с. Значит, скорость течения воды в канале должна быть $v \geq 0,8$ м/с. Если не представится возможным обеспечить скорость воды в магистральном канале выше незаилающей, то потребуется осветление воды, подаваемой в канал, путем строительства водоемов-отстойников.

В 2001 г. измеренная емкость водохранилища Сяоланди на отметке 275 м составляла 12,04 млрд м³, а к 2021 г. она снизилась до 9,411 млрд м³, что является общим снижением на 21,8 %. Эрозия и последующее заиление ложа водохранилища непосредственно влияют на среднегодовое содержание наносов в низовье р. Хуанхэ (рис. 4).

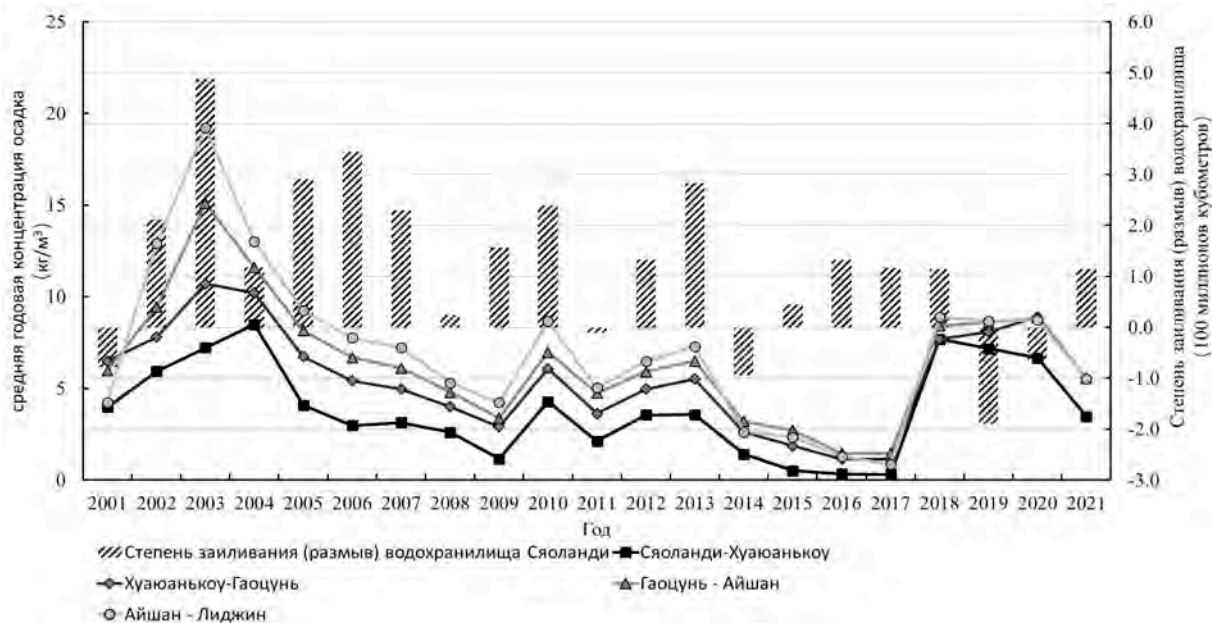


Рис. 4. Изменения эрозии наносов и заиления в зоне влияния водохранилища Сяоланди и их среднегодового содержания на каждом участке р. Хуанхэ

Как видно из рис. 4, отложения в створе водохранилища Сяоланди в 2001 г. находились в состоянии эрозии, после 2002 г. отложения в районе водохранилища – в основном в состоянии заиления. В 2014 г. была проведена частичная очистка водохранилища, а затем оно заиливалось вплоть до 2017 г., когда наступило полное насыщение мертвого объема наносами. Благодаря промывкам в 2019 г. и 2020 г. аккумулярующая способность водохранилища Сяоланди была частично восстановлена.

Выводы

1. Установлены корреляционные связи между годовым стоком воды, содержанием наносов в речном потоке, проходящем через створы реки, в которых расположены гидрологические станции. Корреляционные зависимости показали, что расход наносов в створе нижней гидрологической станции тесно связан с годовым стоком, содержанием наносов в потоке и его расходом через верхнюю станцию.

2. Транспортирующую способность потока рекомендуется определять по формуле (3), а незаиляющую скорость – по зависимости (4). В потоках, сильно насыщенных наносами, что характерно для р. Хуанхэ, плотность смеси воды с наносами $\rho_{см}$ несколько выше плотности чистой воды ρ_v , поэтому в формулах (3) и (4) более правильно принимать плотность двухфазного потока $\rho_{см}$, которая может быть определена равенством (8). По указанным

Согласно рис. 4, среднегодовое содержание наносов в реке на каждом участке в основном соответствует тенденции изменения годового стока и ежегодного переноса наносов в районе гидрологической станции. Их среднегодовое содержание на участке от Сяоланди до Лиджин постепенно увеличивалось, вплоть до 2017 г. После 2017 г. заиление каждого участка реки достигло более высокого уровня, и этот период формирования реки характеризуется интенсивным русловым процессом.

формулам дана оценка транспортирующей способности потока в р. Хуанхэ и незаиляющей скорости в магистральных каналах, подающих воду на орошение.

3. Для определения аккумулярующей способности водохранилища и, соответственно, срока заполнения мертвого объема наносами предлагается использовать разработанные ранее нами формулы (9) и (11).

С 2002 г. водохранилище Сяоланди активно использовалось для аккумуляции наносов, но к 2017 г. емкость для хранения наносов в основном достигла насыщения и способность улавливать наносы резко уменьшилась. Для достижения цели непрерывного и эффективного контроля за наносами и их блокирования проведены мероприятия по интенсивной промывке водохранилища и намечено применение инженерно-технических средств для его очистки.

Библиографический список

1. Study on the characteristics of sediment erosion and siltation in flooded areas with high sediment content in the lower reaches of the Yellow River / Qian Sheng [et al.] // People's Yellow River. – 2021. – 43 (S2). – P. 20–22. [https:// doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.S2.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.S2.008)
2. Чалов, Р. С. Русловедение: теория, география, практика : в 3 т. / Р. С. Чалов. – Москва : Изд. ЛКИ, 2008. – Т. 1. – 608 с.
3. Transformation of bottom sediments in the Yellow River: Reservoir dredging and research on the use of bottom sediment resources / Wang Yuanjiang [et al.] // Water Resources Conservation of China. – 2023. – № 9. – P. 4–11. [https:// doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2023.09.002)
4. Hailong, Tsi. Discussion of factors influencing siltation of river channels in the lower reaches of the Yellow River, and measures to counter them / Tsi Hailong // Scientific and Technical Communication. – 2011. – № 23. – P. 71–72.
5. Shuotsian, Vang. A study of the influence of the Ciaolandi Dam on the river-groundwater system and a typical «suspended river» in the lower reaches of the Yellow River : Master's degree in ecology / Vang Shuotsian ; Henang University. – Nanking, 2021. – 56 p. [https:// doi: 10.27114/d.cnki.ghnau.2021.000345](https://doi.org/10.27114/d.cnki.ghnau.2021.000345)
6. Vengven, Yao. Research on key technologies to maintain basic functions of flood control and sand transport in the Lower Yellow River / Yao Vengven. – Peking : Scientific Press, 2007. – 271 p. [https:// doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2007.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2007.01.013)
7. Preliminary discussion of the mechanism of automatic adjustment of sand holding capacity in the lower reaches of the Yellow River / Qian Ning [et al.] // Journ. of Geography. – 1981. – № 2. – P. 143–156. [https:// doi: 10.11821/xb198102003](https://doi.org/10.11821/xb198102003)
8. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. – Минск : БНТУ, 2021. – 311 с.
9. Михневич, Э. И. Гидрология : пособие / Э. И. Михневич. – Минск : БНТУ, 2021. – 151 с.
10. Михневич, Э. И. Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси) / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 480–489.

Поступила 11 марта 2024 г.