

УДК 504.06 : 504.4

В.И. Лебухов,**канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры товароведения
торгово-технологического факультета****Хабаровского государственного университета экономики и права****ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И
ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

Освоение прирусловых долин сопровождается выносом в водные объекты сконцентрированных в аллювиальных отложениях глинистых минералов, представленных частицами различной крупности. Повышенное содержание дисперсной минеральной фазы, изменяя физические и химические свойства воды и нарушая функционирование водных экосистем, приводит к деградации и разрушению их структуры. Проведённые автором численные оценки показывают, что для реальных дисперсий с повышенным содержанием твёрдого, при температуре воды близкой к 0°C, седиментационно устойчивы не только коллоиды и сверхтонкие, но также тонкие частицы (до 110 мкм), способные переноситься водотоками на значительные расстояния изменяя биоценозы прилегающих территорий. Показано, что при последовательном расположении предприятий загрязнение возрастает пропорционально увеличению их числа и снижению порядка водотока.

Ключевые слова: прирусловые долины, водные объекты, физические и химические свойства воды, функционирование водных экосистем.

The development of river point valleys includes the removal of water bodies that are concentrated in alluvial retentions of clay minerals represented by particles of different size. The high content of dispersed mineral phase which is changing the physical and chemical properties of water and disrupting the functioning of aquatic ecosystems leads to the degradation and destruction of their structure. Numerical calculations conducted by the author show that for real dispersions with a high firm structure with the water temperature close to 0 ° C, the colloids, ultrafine and fine particles (110 μm) capable to be transported by water streams at considerable distances by changing the biogenesis of the surrounding areas have sedimentation stability. It is shown that the sequential arrangement of the enterprises leads to the increased pollution in proportion to increasing of their number and decreasing stream order.

Keywords: river point valleys, water bodies, physical and chemical properties of water, functioning of aquatic ecosystems.

Природная специфика большей части территории регионов Дальнего Востока и Сибири (свыше 70 %) характеризуется необычайно высокой уязвимо-

стью природных комплексов по отношению к хозяйственной деятельности человека, что находит выражение, как минимум, в двух обстоятельствах. Во-

первых, в более высокой, чем в экосистемах европейской части России, их трансформации при идентичной нагрузке, во-вторых, в более экстремальных и соответственно более затратных условиях ведения хозяйства. И первый и второй факторы прямо и опосредованно проявляются в формировании экологической ситуации. В регионе основная масса производств представлена горнодобывающими и перерабатывающими предприятиями, которые размещены в гористой местности и приурочены к водотокам. В процессах горной добычи и технологического передела образуется большое количество тонкодисперсных взвесей, эти взвеси концентрируются в технологических, промывных, ливневых водах, и в итоге значительная их часть выносится водотоками с территории полигонов и попадает в речную систему.

При освоении прирусловых долин в водные объекты (озёра, реки, ручьи) неизбежно попадают сконцентрированные в аллювиальных отложениях глинистые минералы, представленные частицами различной крупности. Размеры этих частиц варьируют в широких пределах – от нескольких тысяч до долей микрона. Различают грубые частицы: их размеры превышают 500 мкм; частицы средней крупности – от 500 до 100 мкм; тонкие частицы, эффективный диаметр которых лежит в пределах 100–40 мкм;

сверхтонкие частицы, гидравлическая крупность которых находится в интервале 40–0,2 мкм. Если объекты имеют характерные размеры, менее 0,2 мкм, их определяют как коллоиды (золи) [1]. Сверхтонкие частицы и золи природных взвесей представляют в совокупности тонкодисперсные частицы.

Повышенное содержание тонкодисперсной минеральной фазы изменяет физические и химические свойства воды, при этом нарушается функционирование структур водных экосистем и они разрушаются, увеличивается число рыб с патологией, сопровождающейся накоплением токсичных элементов и тяжёлых металлов в их внутренних органах и мышцах, снижаются биоразнообразие, численность и биомасса населяющих водоёмы гидробионтов. В работе [2] описан факт значительного пространственного нарушения (вынос мутного шлейфа примерно на 20 км вдоль водотока) биоценоза реки Биллях в 2005 г., вызванного прорывом дамбы. Как следствие, у рыб повсеместно наблюдались ослизнение и бледность жабр, из бентосного сообщества выпали пиявки, личинки хиромонид, жуков, подёнок, веснянок и ручейников, общая численность зоопланктона снизилась до 65 экз./м³ (при фоновой численности = 5300 экз./м³), а биомасса упала до 1,5 мг/м³ (фоновая = 329 мг/м³).

Особо сильному антропогенному давлению водные системы подвержены в зоне влияния горных предприятий и их вспомогательных служб, так как именно они аккумулируют воздействие всех негативных процессов и загрязнений наземных экосистем. Практически во всех обследованных водотоках превышена предельно допустимая концентрация для ряда химических веществ, в частности: концентрация соединений фосфора (первый класс опасности) превышает ПДК для рыбохозяйственных водоёмов в десятки – сотни раз, ртути в 1,5 – 9 раз, повышено содержание соединений Cd, Se, Zn, В, Cu, Pb, взвешенных частиц. В загрязнённых водотоках повсеместно отмечено снижение видового состава, численности, биомассы гидробионтов [3]. Деграция водных сообществ развивается пропорционально уровню техногенной трансформации среды обитания гидробионтов.

Особую опасность для гидробионтов представляют тонкодисперсные частицы, что обусловлено двумя факторами: крайне низкой скоростью осаждения частиц и их крайне высокой удельной поверхностью, а значит, и высокой сорбционной способностью, определяющей биологическую и физико-химическую активность этих объектов.

Для частиц дисперсной фазы $\leq 0,5$ мкм активно проявляется эффект бро-

уновского движения, которое поддерживает их равномерное распределение в объёме дисперсии, и такие частицы практически не осаждаются. Транзит более крупных частиц в естественном водотоке имеет сложный характер, но для описания их движения можно воспользоваться традиционными представлениями физики сплошных сред [4], приняв во внимание то, что на помещённую в жидкость твёрдую сферическую частицу действуют:

сила тяжести

$$P = W_T \cdot \rho_T \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot \rho_T \cdot g, \quad (1)$$

Архимедова сила выталкивания

$$R = W_T \cdot \rho_{ж} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g, \quad (2)$$

гидравлическое сопротивление среды, вызванное падением частицы

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \Psi_0 \cdot R_T \cdot V, \quad (3)$$

где Ψ_0 – характеристическая вязкость среды; c – весовая концентрация в ней твёрдой фазы; W_T – объём частицы; ρ_T и $\rho_{ж}$ – соответственно плотности частицы и жидкости; g – ускорение свободного падения; V – скорость падения частицы; R_T – радиус частицы. Следует отметить, что представленный выражением (1.3) закон Стокса справедлив только для медленных частиц, имеющих малые радиусы. Движение более крупных и быстрых частиц описывается иной формулой гидравлического сопротивления, которая

имеет следующий вид:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \Psi_0 \cdot R_T \cdot V \cdot \left(1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot V \cdot R_T}{\Psi} + \dots \right),$$

где величина $\left(\frac{\rho_{ж} \cdot V \cdot R_T}{\Psi} \right)$ называется

числом Рейнольдса. Когда число Рейнольдса велико, возникает турбулентность, и гидравлическое сопротивление среды возрастает пропорционально квадрату скорости частицы: $F \approx V^2$ [5].

Воспользуемся формальным условием баланса сил $P + F + R = 0$ и, подставив в него вышеприведённые соотношения, проведя необходимые преобразования и раскрыв полученное выраже-

ние, в явном виде найдём зависимость между скоростью осаждения частицы, её размером и характеристиками среды:

$$V = R_T^2 \cdot \frac{2}{9} \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{ж}) \cdot \frac{1}{\Psi} = Const \cdot \frac{R_T^2}{\Psi}. \quad (4)$$

Характеристическая вязкость дисперсии при небольших концентрациях твёрдой фазы с достаточной точностью соответствует динамической вязкости воды, которая приведена в таблице для интервала температур от 0 до 20 °С [6, 7].

Таблица – Зависимость динамической вязкости воды Ψ от температуры при нормальном давлении

Температура (°С)	0	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\Psi \cdot 10^3$ (Па·с)	1,721	1,567	1,473	1,386	1,308	1,237	1,172	1,112	1,057	1,005	0,960

Из анализа выражения (4) следует, что при низкой температуре промывной воды в ней способны накапливаться более крупные частицы, следовательно, гранулометрический состав взвесей, относящихся к тонкодисперсным фракциям, изменяется не только в зависимости от состава вмещающих пород, но и от широтной расположенности предприятия и сезонности проведения горных работ. В работе [8] показано, что в сильно разбавленных дисперсиях при

комнатной температуре скорость осаждения глинистых частиц размером 5 мкм составляет 11,5 мм/час, значит, приняв во внимание соотношение (4), можно сделать вывод о том, что при температуре воды, близкой к 0°С, размер частиц, осаждающихся с той же скоростью, возрастёт примерно в $\sqrt{2}$ раз до 7,2 мкм.

Ливневые воды, формирующие стоки с поверхности нарушенных территорий, дорог, селитебной зоны, промыв-

ные и сточные воды предприятий далеки от идеальных разбавленных дисперсий, концентрация твёрдого в них велика, а гранулометрический и минеральный состав варьирует в широких пределах, поэтому необходимо рассматривать седиментацию отдельной частицы в условиях её стеснённого падения.

В работе [9] выведена формула вязкости однородной дисперсии, представленной малыми сферическими частицами с плотностью n :

$$\Psi = \frac{5n}{2} \cdot \left(\frac{4\pi \cdot R_T^3}{3} \right) = const \cdot n \cdot R_T^3. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получим:

$$V = const \cdot \frac{1}{R_T \cdot n}. \quad (6)$$

Анализ соотношения (6) показывает, что увеличение концентрации частиц в дисперсии приводит к повышению её седиментационной устойчивости, при этом фактор крупности частиц становится менее значимым, то есть седиментационно устойчивыми становятся более грубые суспензии. С.С. Забродским [10] подтверждена обратная зависимость между концентрацией частиц и их скоростью при рассмотрении гидродинамической модели потока в приближении Тодеса-Розенбаума.

Процесс стеснённого падения частиц в приближении реальной дисперсии нигде теоретически не описан, но для оценочных расчётов А.М. Годэном [11] бы-

ло предложено уравнение, связывающее скорость стеснённого падения разнородных частиц V_{cm} с их суммарной объёмной концентрацией в жидкости:

$$V_{cm} = V_{cs} \cdot (1 - \gamma) \cdot (1 - \gamma)^{2/3} \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma), \quad (7)$$

где γ – объёмная концентрация твёрдого в дисперсии, V_{cs} – скорость свободного падения частиц в жидкости. В работе [12] рассмотрен вариант, в котором стеснённость условий падения частицы характеризуется не объёмным, а весовым содержанием твёрдого компонента в пульпе:

$$V_{cm} = V_{cs} \cdot \left(1 - \frac{T_i}{T_{max}} \right), \quad (8)$$

где T_i – действительное весовое содержание твёрдой фазы во взвеси; T_{max} – максимально возможное процентное содержание, определяемое по формуле:

$$T_{max} = \frac{\rho_T}{(\rho_T - \rho_J) + \frac{6}{\pi} \cdot \rho_J} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Найденным для реальной разбавленной дисперсии численным значением V_{cm} можно воспользоваться для определения значения критического (максимального) диаметра частиц, образующих устойчивую систему. У реальных природных дисперсий плотность вмещённой фазы примем равной $2,5 \text{ кг/м}^3$ (что соответствует средней плотности глинистых минералов [13]), $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, плотность воды в рабочих интервалах температур с хорошей точностью равна

1000 кг/м³, отношение т/ж в реальных стоках изменяется от 1 до 10 г/дм³. Упростим формулу (4), подставив реальные значения:

$$V \approx 3,3 \cdot \frac{R_T^2}{\Psi} . \quad (10)$$

С помощью соотношения (7) оценим размер частицы, которая выпадает со скоростью 11,5 мм/ час из дисперсии, имеющей т/ж = 2,5 г/дм³, что соответствует $\gamma = 10^{-3}$:

$$V_{cm} = 3,3 \cdot \frac{R_T^2}{\Psi} \cdot (1 - 10^{-3}) \cdot (1 - 10^{-3})^2 \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma) \Rightarrow R_T^2 = 6,603 \cdot 10^{-3} \Rightarrow R \approx 0,0813 \text{ (мм)} = 81 \text{ мкм}.$$

Проведённые численные оценки показывают, что со снижением температуры воды и с повышением содержания взвесей в ней повышается седиментационная устойчивость частиц, в частности увеличение концентрации твёрдого до 2,5 г/л приводит к ситуации, когда частицы размером ~80 мкм осаждаются со скоростью, характерной для 5 микронных частиц, а если учесть температурную зависимость, отражённую в формуле (4), то можно утверждать, что в реальных дисперсиях при температуре, близкой к 0°C, седиментационно устойчивыми становятся не только коллоиды и сверхтонкие, но также тонкие частицы с размерами до 110 мкм, которые способны переноситься водотоками на очень значительные расстояния, изменяя биоценозы прилегающих территорий.

Экологические последствия техноген-

ного вмешательства определяются не только используемыми технологиями и объёмами производства при освоении прирусловых территорий, но и особенностями строения речной системы. Среди этих особенностей ведущую роль играют орография водосборной площади, густота и разветвлённость речной сети, уклон речных долин и дебет единичных водотоков.

В южной части Дальневосточного региона России наиболее освоена территория речного водосбора реки Амур, которая формировалась в течение огромного отрезка геологического времени. Расположенная в пределах Сибирской платформы горная северо-западная часть оформилась как континент еще в раннем докембрии; образование западных горных массивов Хинганно-Буреинского и Ханкайского началось в нижнем палеозое; наращивание территории на востоке происходило за счет складкообразования по периферии платформ и срединных массивов, в результате чего Сибирская и Китайская докембрийские платформы в конце палеозоя – мезозое оказались скрепленными палеозойскими и раннемезозойскими складчатыми сооружениями; свое геосинклинальное развитие продолжили восточная часть Сихотэ-Алиня, Сахалин и Курильская островная дуга; в мезозое происходило образование ряда межгорных депрессий, являющихся основани-

ем большей части дальневосточных равнин; на границе мезозоя с палеогеном формировались горы Сихотэ-Алинь, а в неогене – острова Курильской гряды, где эндогенные процессы продолжают активно протекать и в настоящее время. Рельеф до наших дней повсеместно подвергается размыву и денудации на фоне дифференцированных подвижек отдельных блоков. Детальное рассмотрение карты территории показывает следующее:

- водосборная площадь имеет гористый рельеф;
- речная сеть сильно разветвлена и характеризуется высокой густотой;
- основное количество месторождений, а значит, и горнодобывающих предприятий, дислоцировано на притоках высоких порядков;
- большинство водотоков системы

представлено горными реками с достаточно высокими скоростями течения;

- для региона наиболее типично последовательное расположение нескольких добывающих предприятий вдоль водотоков различного порядка.

При доминирующем в настоящее время способе очистки вод посредством их последовательного отстаивания в каскаде прудов-отстойников, тонкодисперсные минеральные примеси не извлекаются из воды и сбрасываются в речную сеть.

Величина этого вида загрязнения природных вод в случае последовательного расположения источников (предприятий) возрастает по кумулятивной кривой пропорционально увеличению числа предприятий и снижению порядка водотока в речной системе (см. рисунок).

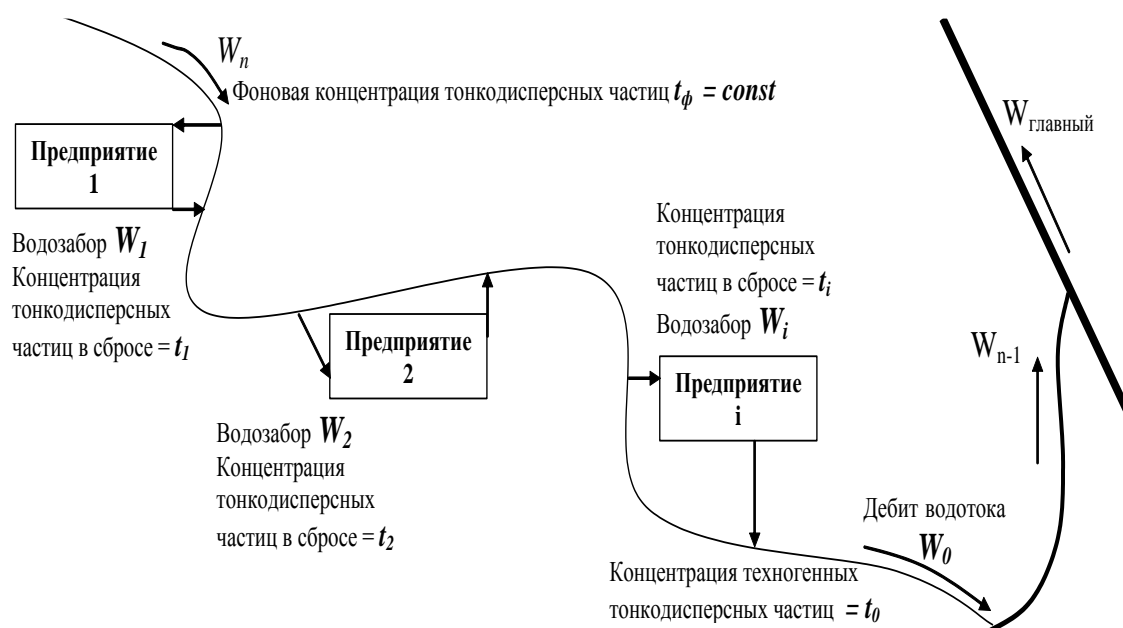


Рисунок – Принципиальная схема формирования техногенных загрязнений водотоков тонкодисперсными взвесями при разработке россыпей

Для водотока высокого порядка (n), на котором эксплуатируется несколько (N) месторождений, общий сброс в него тонкодисперсных фракций (T_n) составит:

$$T_n = \sum_{i=1}^{i=N} W_i \cdot t_i, \quad (11)$$

если считать, что происходит сброс с нормативным загрязнением, то $t_i = t_{норм}$, и $T_n = \sum_{i=1}^{i=N} W_i \cdot t_{норм}$, где N – число предприятий на водотоке $n^{го}$ порядка, W_i – водозабор, обеспечивающий нужды $i^{го}$ предприятия. Тогда уровень загрязнения этого водотока ниже места впадения стоков последнего предприятия составит:

$$t_n = \frac{T_n}{W_n} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} W_i \cdot t_{норм}}{W_n}, \quad (12)$$

где W_n – общий дебет водотока $n^{го}$ порядка, на котором размещено N объектов.

Анализ выражения (12) показывает, что необходимость соблюдения нормативного показателя по водотоку в целом приводит к ограничению числа последовательно расположенных предприятий даже в том случае, когда каждое из них соблюдает нормативные требования к стоку. Максимально возможное по условиям экологической безопасности для водотока число предприятий на нём ($N_{np.}$) составит:

$$N_{np.} = \frac{W_n}{W_{i-ep.}}, \quad (13)$$

где $W_{i-ep.}$ соответствует усреднённой для этих предприятий водозабору.

При освоении территорий в верховьях водотоков высокого порядка загрязнению тонкодисперсными взвесями подвергаются все водотоки речной системы, включая и ствол (главную реку). Общее количество твёрдых взвесей при этом интегрально возрастает по мере снижения порядка притока в системе, а удельный показатель замутнения вод (t_{zl}) изменяется обратно пропорционально дебиту принимающих загрязнение водотоков (W_{zl}):

$$t_{zl} = \frac{\sum_{f=1}^{f=N_2} \left(\sum_{j=1}^{j=N_1} \left(\sum_{i=1}^{i=N_n} W_i \cdot t_i \right)_j \right)_f}{W_{zl}}. \quad (14)$$

Особенно чувствительны к подобным воздействиям водотоки, в которых нерестятся проходные анадромные виды, представленные в бассейнах рек Дальнего Востока тихоокеанскими лососями.

Сохранение рыбохозяйственного и биосферного значения прирусловых долин и водотоков российского Дальнего Востока является важнейшим условием освоения гигантской по площади территории. Если это условие не будет соблюдено, то страна рискует остаться как без изъятых и

невозобновимых минеральных ресурсов, так и без базы для возобновляемых биологических ресурсов, а значит, и без собственного будущего.

Список использованных источников

- 1 Химическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. И. Л. Кнунянца. М. : Сов. энциклопедия. 1988.
- 2 Резник И. В. Экологическое состояние рек Унгра и Чульман (бассейн р. Алдан, Южная Якутия) : дис. ... канд. биолог. наук. / И. В. Резник. Владивосток : 2011. 119 с.
- 3 Современное состояние окружающей среды на территории Куранахского проекта : отчёт по НИР. Якутск, 1998.
- 4 Исихара А. Статистическая физика / А. Исихара. М. : Мир, 1973. 472 с.
- 5 Хуанг К. Статистическая механика / К. Хуанг. М. : Мир, 1966. 520 с.
- 6 Дубровский И. М. Справочник по физике / И. М. Дубровский, Б. В. Егоров, К. П. Рябошапка. Киев : Наукова думка. 1986. 558 с.
- 7 Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О. С. Богданова, В. И. Ревнивцева. М. : Недра, 1972. 446 с.
- 8 Никулин И. И. Экспресс-приёмы выделения тонкодисперсных минералов из цемента осадочных пород / И. И. Никулин // Вестник ВГУ. 2010. № 1. С. 286–292. (Геология).
- 9 Ландау Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : Гос. изд. технико-теор. лит. 1953. Т.6. 473 с.
- 10 Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое / С. С. Забродский. М. – Л. : Изд-во ГЭИ. 1963. 120 с.
- 11 Годэн А. М. Основы обогащения полезных ископаемых / А. М. Годэн. М. : Metallurgizdat, 1946. 250 с.
- 12 Олевский В. А. Конструкция и расчёт механических классификаторов и гидроциклонов / В. А. Олевский. М. : Углетехиздат, 1958. 256 с.
- 13 Браун К. Минералогическая энциклопедия / К. Браун; под ред. К.Фрея. Л. : Недра, 1985. С. 200–206.