

ПРЕДМЕТ: Гидрология

ТЕМА 11 | Изучение речных стоков и наносов



НАЗРАЛИЕВ ДИЛШОД ВАЛИДЖАНОВИЧ



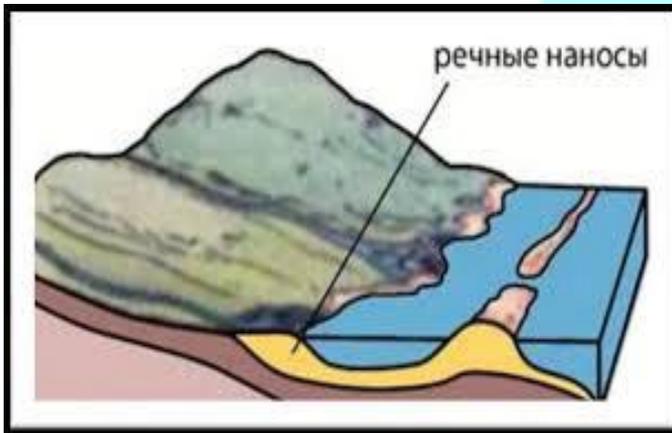
Доцент кафедры Гидрологии и гидрогеологии

ПЛАН ТЕМЫ:

- Происхождение, характеристики и классификация речных наносов ;
- Движение влекомых наносов.
Движение взвешенных наносов;
- Сток наносов

Речные наносы

Речные наносы – это твердые, в основном минеральные, частицы, переносимые речным потоком в его толще и по дну и формирующие донные отложения в русле и на пойме.



Главные источники поступления наносов

Главными источниками поступления наносов в реки служат :

- поверхность водосборов, подвергающаяся эрозии в период дождей и снеготаяния,
- и сами русла рек, размываемые речным потоком.

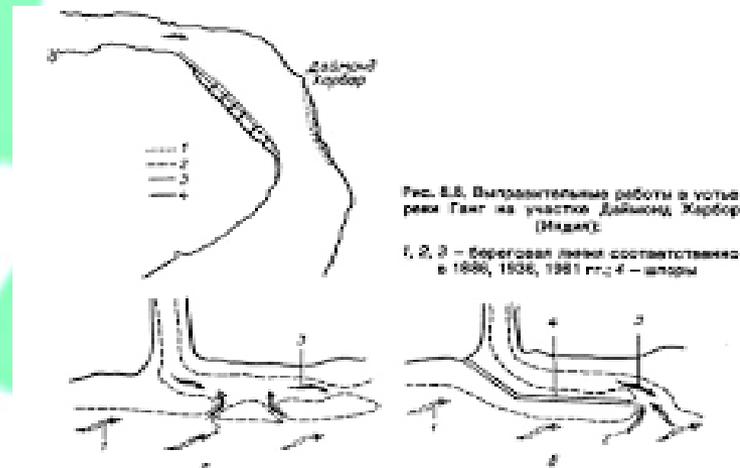
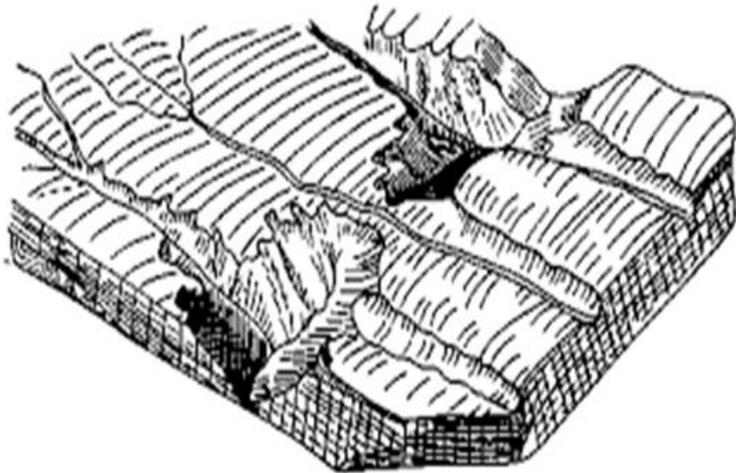


Рис. 8.9. Выправительная дамба на прибрежной отмели у устья реки:
а – невыправленный вход в реку, происходящий под воздействием вдольбереговых течений; б – выправленный вход в реку; 1 – направление преобладающего волнения; 2 и 3 – течения в фазы соответственно прилива и отлива; 4 – направляющая дамба на прибрежной отмели

Эрозия водосборов

Эрозия водосборов – процесс очень сложный, зависящий как от эродирующей способности стекающих по его поверхности дождевых и талых вод, так и от противоэрозионной устойчивости почв и грунтов водосбора.



Эрозия поверхности водосборов

Эрозия поверхности водосборов (и поступление ее продуктов в реки) обычно тем больше:

- чем сильнее дожди и интенсивнее снеготаяние,
- чем больше неровности рельефа,
- рыхлее грунты (наиболее легко подвергаются эрозии лёссовые грунты),
- менее развит растительный покров,
- сильнее распаханность склонов.

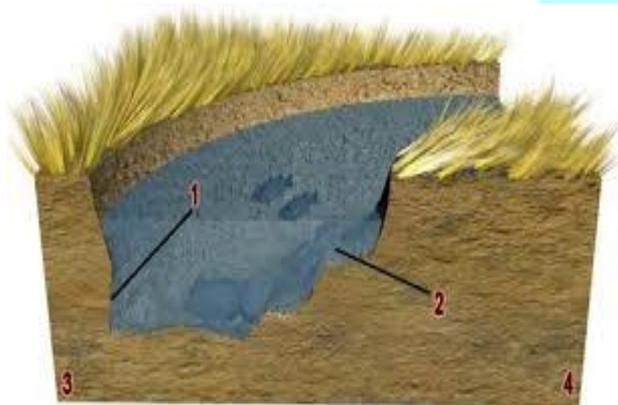


Эрозия речных русел

Эрозия речных русел тем сильнее

- ❑ чем больше скорости течения в реках и
- ❑ менее устойчивы грунты, слагающие дно и берега.

Часть наносов поступает в русло рек при абразии (волновом разрушении) берегов водохранилищ и речных берегов на широких плесах.



Геологическая деятельность рек

Глубинная эрозия



Глубинная эрозия
где реки поворачивают
склоны — УЩЕЛЬЕ



Боковая эрозия

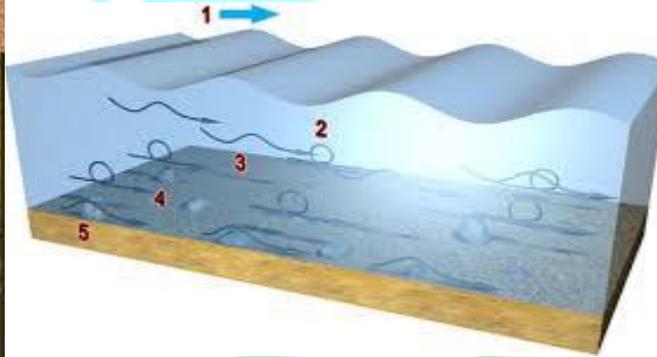


В результате
расширения
речных



Донные отложения

Наносы, слагающие дно рек, называют донными отложениями или аллювием.



Наибольшая концентрация взвешенных наносов

Наибольшую концентрацию взвешенных наносов (мутность воды) обычно имеют реки с паводочным режимом или протекающие в условиях засушливого климата и легкоразмываемых грунтов.

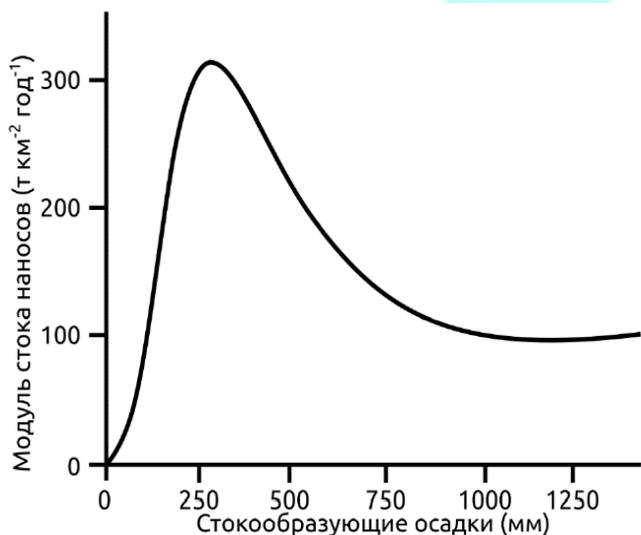


Рисунок 1.2.1. Правило Лангбейна — Шумма для рек США [Langbein, Schumm, 1958]

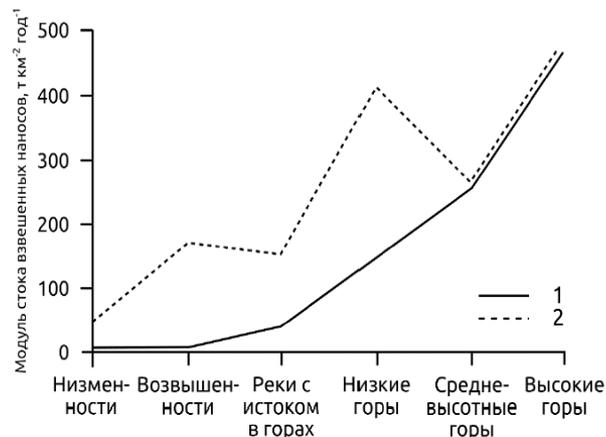


Рисунок 1.2.2. Зависимость модуля стока взвешенных наносов от рельефа местности: 1 — естественный сток наносов; 2 — антропогенно-измененный [Dedkov, Moszherin, 1992]

Средняя мутность в период естественного режима

Например, в период естественного режима, т. е. до зарегулирования рек и начала крупного изъятия речных вод на хозяйственные нужды, средняя мутность Хуанхэ, Амударьи, Колорадо, Инда составляла 22–26, 5,8, 2,8 и 1,9 кг/м³



Определение цветности и мутности воды

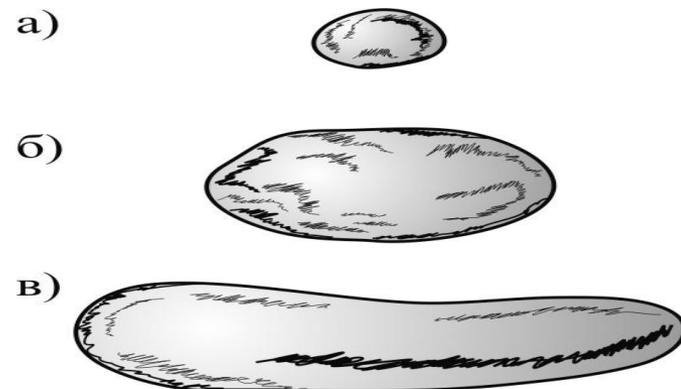


Наиболее важные характеристики наносов следующие:

геометрическая крупность, выражающаяся через диаметр частиц наносов (D , мм);

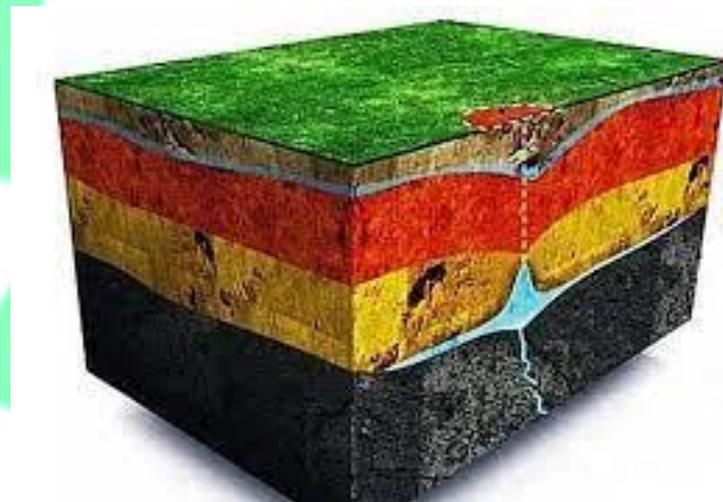
гидравлическая крупность, т. е. скорость осаждения частиц наносов в неподвижной воде (w , мм/с, мм/мин);

плотность частиц (ρ_n , кг/м³), равная для наиболее распространенных кварцевых песков 2650 кг/м³;



Наиболее важные характеристики наносов

плотность отложений (плотность грунта) ($\rho_{отл}$, кг/м³), зависящая от плотности частиц и пористости грунта (плотность илистых отложений на дне рек обычно составляет в среднем 500–1000 кг/м³, песчаных 1500–1700, смешанных 1000–1500 кг/м³);



Наиболее важные характеристики наносов

концентрация (содержание) наносов в потоке, которую можно представить как в относительных величинах (отношение массы или объема наносов к массе или объему воды), так и в абсолютных величинах;

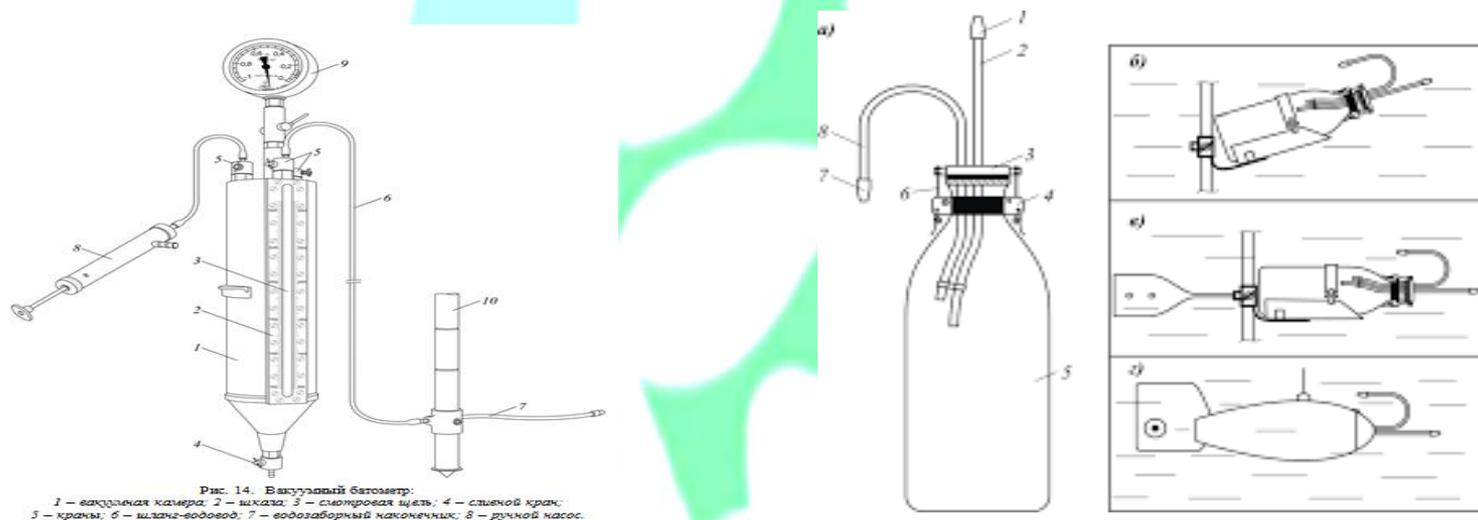
В последнем случае используют понятие мутность воды (s , г/м³, кг/м³), которая вычисляется по формуле

$$s = m/V,$$

где : m – масса наносов в пробе воды,
 V – объем пробы воды.

Определение мутности

Мутность определяют путем фильтрования отобранных с помощью батометров проб воды и взвешивания фильтров до и после фильтрования и их высушивания.



По геометрической крупности наносы делят на фракции

Классификация наносов по размеру частиц (мм)

Градации	Название фракций						
	глина	ил	пыль	песок	гравий	галька	валуны
Мелкие		0,001–0,005	0,01–0,05	0,1–0,2	1–2	10–20	100–200
Средние	<0,001	–	–	0,2–0,5	2–5	20–50	200–500
Крупные		0,005–0,01	0,05–0,1	0,5–1	5–10	50–100	500–1000



В реальных условиях и наносы, переносимые речным потоком, и донные отложения представляют собой смесь наносов различной крупности

Такие наносы и отложения классифицируют с учетом преобладающих фракций (илистый песок, песчанистый ил и т. д.).



Путем так называемого механического анализа в лаборатории определяют, как распределяются по фракциям наносы в любой данной пробе, взятой в реке.

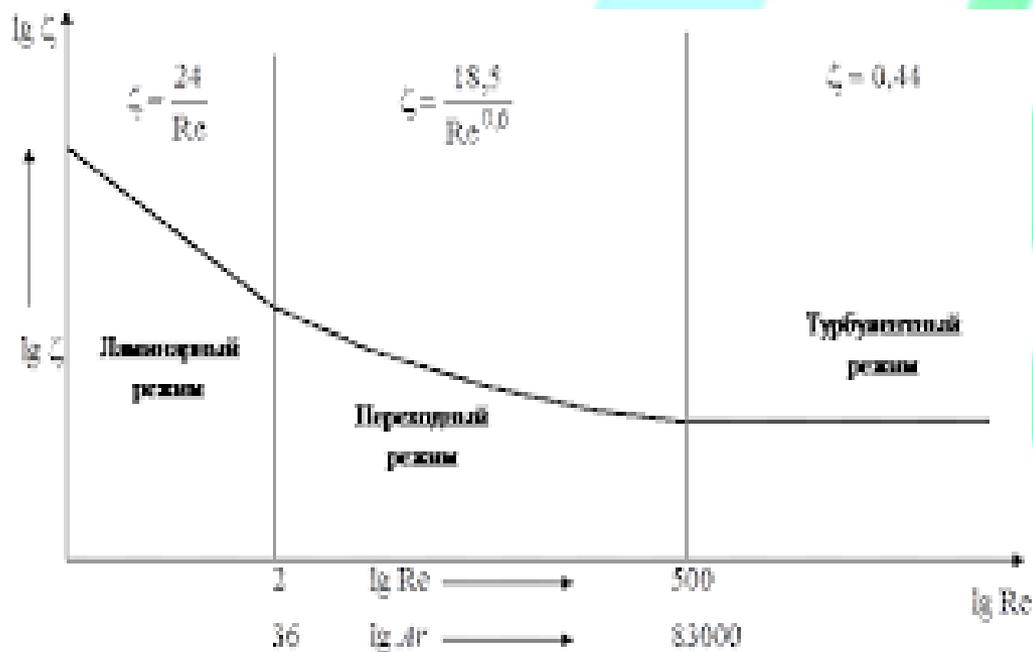
Среднюю крупность наносов в такой смеси $D_{\text{ср}}$ определяют по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i p_i}{100},$$

где D_i и p_i – средняя крупность наносов каждой фракции и ее доля по массе (в %) во всей пробе, n – число фракций.

Гидравлическая крупность наносов зависит от их геометрической крупности по-разному для мелких и крупных частиц

Наносы крупнее 1,5 мм осаждаются в неподвижной воде с повышенными скоростями по извилистым, винтообразным траекториям (такой режим осаждения частиц назван турбулентным);



Режимы осаждения взвешенных частиц

- ламинарный ($d < 0,15$ мм)
 $w \sim \rho d^2 / \mu$, $\rho = (\rho_s - \rho) / \rho$
- переходный ($0,15 < d < 1,5$ мм)
 $w \sim \rho d / \mu$ μ - вязкость воды
- турбулентный ($d > 1,5$ мм)
 $w \sim (\rho d)^{0,5}$

Для этого случая связь гидравлической W и геометрической крупности D выражается формулой

$$w = k \sqrt{\frac{g(\rho_n - \rho)D}{\rho}},$$

где ρ_n и ρ – плотность частиц наносов и воды.

Наносы мельче 0,15 мм осаждаются в неподвижной воде медленно и практически по прямой линии (такой режим падения частиц называли ламинарным)

в этом случае связь w и D будет иная:

$$w = \frac{g(\rho_n - \rho)D^2}{18\rho\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды, зависящий от ее температуры

В диапазоне крупности наносов 0,15–1,5 мм

В диапазоне крупности наносов 0,15–1,5 мм режим осаждения частиц **переходный**, и связь между w и D описывается более сложными формулами.

Таким образом

- ❑ Для относительно крупных наносов гидравлическая крупность растет пропорционально корню квадратному из их геометрической крупности,
- ❑ а для мелких наносов гидравлическая крупность увеличивается пропорционально квадрату диаметра частиц наносов и уменьшается с возрастанием вязкости воды при уменьшении ее температуры.

Ниже приведены величины гидравлической крупности частиц при температуре воды 15°C:

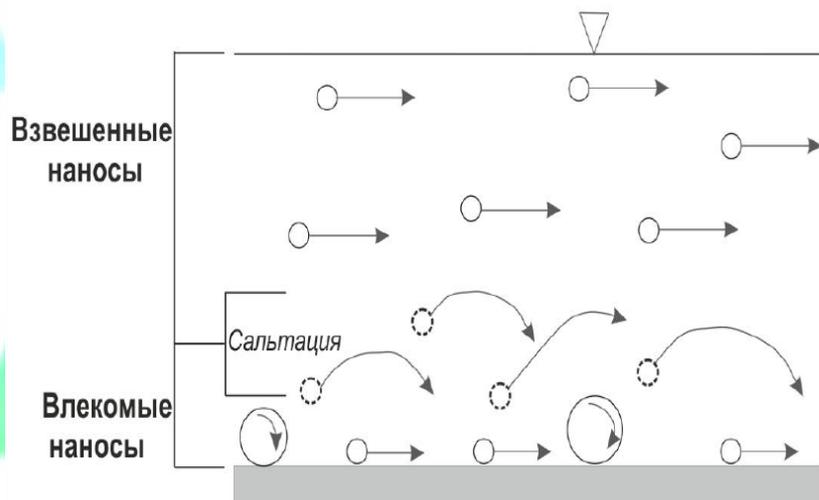
Диаметр частиц, мм	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
Гидравлическая крупность, мм/с	100	60	21	8	2	0,08	0,03	0,0008

Разделение типов по характеру перемещения

По характеру перемещения в реках наносы разделяют на два основных типа :

- взвешенные и
- влекомые.

Структура речных наносов



Промежуточным типом являются сальтирующие наносы, движущиеся скачкообразно в придонном слое; наносы этой промежуточной группы часто условно объединяют с влекомыми.

Фракции минеральных частиц

Фракция	d, мм	Речные наносы
валуны	> 100	влекомые
галька	100-10	влекомые
гравий	10-1	влекомые
песок	1-0,1	влекомые, взвешенные
пыль	0,1-0,01	взвешенные
ил	0,01-0,001	взвешенные
глина	< 0,001	взвешенные

Движение влекомых наносов

Русловые отложения горного притока р.Янцзы



Валунно-глыбовые отложения в руслах горных рек



Влекомые наносы – это наносы, перемещающиеся речным потоком в придонном слое и движущиеся скольжением, перекачиванием или сальтацией.

Путем влечения по дну перемещаются наиболее крупные частицы наносов

- песок,
- гравий,
- галька,
- валуны.



В направлении, параллельном дну, на частицу действуют две силы:

- сила лобового давления текущей воды, стремящаяся сдвинуть частицу и пропорциональная квадрату придонной скорости течения и площади сечения частицы,
- противоположно направленная сила трения, удерживающая частицу на дне.

Начальная скорость

Анализ баланса перечисленных сил приводит к выражению для так называемой «начальной скорости», при которой частица на дне теряет свою устойчивость:

$$u_{\text{дно}_0} = a\sqrt{gD},$$

где a – коэффициент, зависящий от плотности частицы и воды, формы частицы, коэффициента трения и др.

Условие критерия начала движения влекомых наносов

Таким образом, критерием начала движения влекомых наносов в реках является условие

$$u_{\text{дно}} > u_{\text{дно}_0},$$

где $u_{\text{дно}}$ – фактическая придонная скорость течения

Зависимость между «начальной скоростью» и объемом

Из уравнения $u_{\text{дно}_0} = a\sqrt{gD}$, путем возведения обеих частей в шестую степень получим зависимость между «начальной скоростью» и объемом или весом перемещающихся частиц:

$$F_g \sim D^3 \sim u_{\text{дно}_0}^6$$

Эта формула получила название закона Эри

Утверждающего, что вес влекомых наносов пропорционален шестой степени скорости течения.

Условия поведения частиц на дне реки

- превышение критической (начальной, неразмывающей) скорости потока

$$u > u_n$$

- величина u_n зависит от диаметра русловых отложений d

$$u_n = a\sqrt{gd}$$

- закон Эри $P \sim U^6$

Из формулы Эри следует

Что увеличение скорости течения, например, в 2, 3, 4 раза приводит к увеличению веса перемещающихся по дну частиц наносов соответственно в 64, 729, 4096 раз.



Это как раз и объясняет

Почему на равнинных реках с малыми скоростями течения поток может переносить по дну лишь песок, а на горных с большими скоростями – гальку и даже огромные валуны.



Для перемещения по дну :

- ❑ песка необходимы придонные скорости течения не менее 0,10–0,15 м/с,
- ❑ гравия – не менее 0,15–0,5,
- ❑ гальки – 0,5–1,6,
- ❑ валунов – 1,6–5 м/с.

Средняя скорость потока должна быть еще больше.

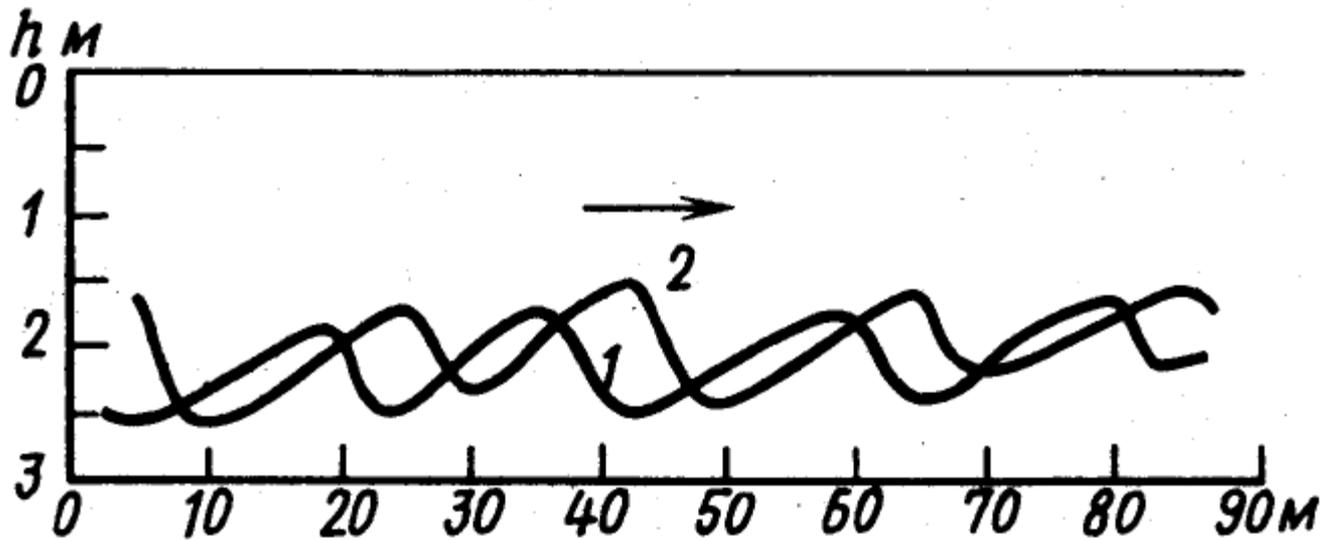
Влекомые наносы могут перемещаться по дну рек

- либо сплошным слоем,
- либо в виде скоплений, т. е. дискретно.

Второй характер движения влекомых наносов для рек наиболее типичен



Скопления влекомых наносов
представлены донными грядами
различного размера



Донные гряды на дне реки в два
последовательных момента времени (1 и 2)

Движение взвешенных наносов

Взвешенные наносы переносятся в толще речного потока.

Условием такого перемещения служит соотношение

$$u_z^+ \geq w,$$

Где u_z^+ – направленная вверх вертикальная составляющая вектора скорости течения в данной точке потока,
 w – гидравлическая крупность частицы наносов.

Важнейшие характеристики при движении взвешенных наносов

Это:

☐ мутность воды s ,
определяемая по
формуле

$$s = m/V,$$

m - масса наносов в пробе воды

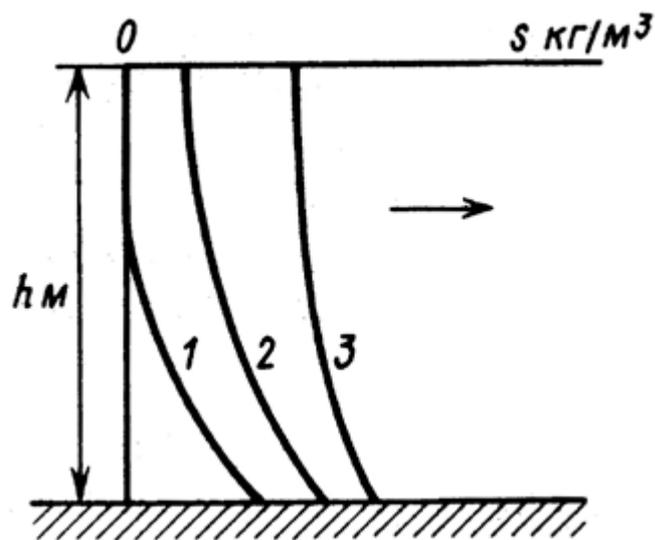
V - объем пробы воды

☐ расход взвешенных наносов $R = sQ$,

где R в кг/с, s в кг/м³, Q в м³/с.

Взвешенные наносы распределены в речном потоке неравномерно:

В придонных слоях мутность максимальна и уменьшается по направлению к водной поверхности, причем для взвешенных наносов более крупных фракций быстрее, для наносов мелких фракций – медленнее



Типичное распределение мутности воды по глубине речного потока при крупности взвешенных наносов

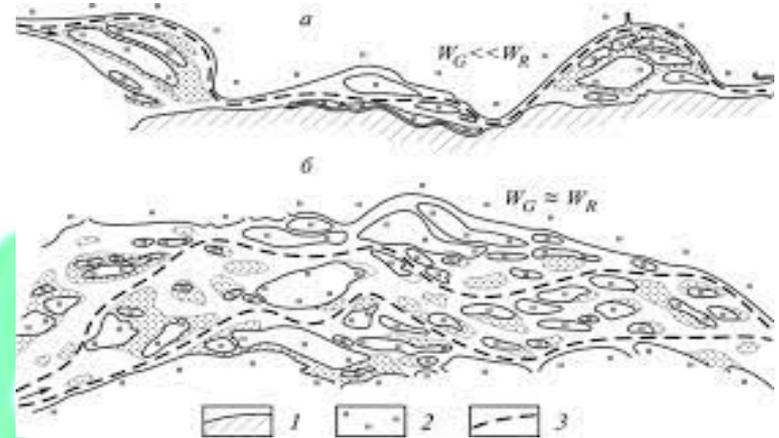
1 – наибольшей, 2 – средней,
3 – наименьшей

Сток наносов

Сток наносов реки включает:

- сток взвешенных;
- сток влекомых наносов.

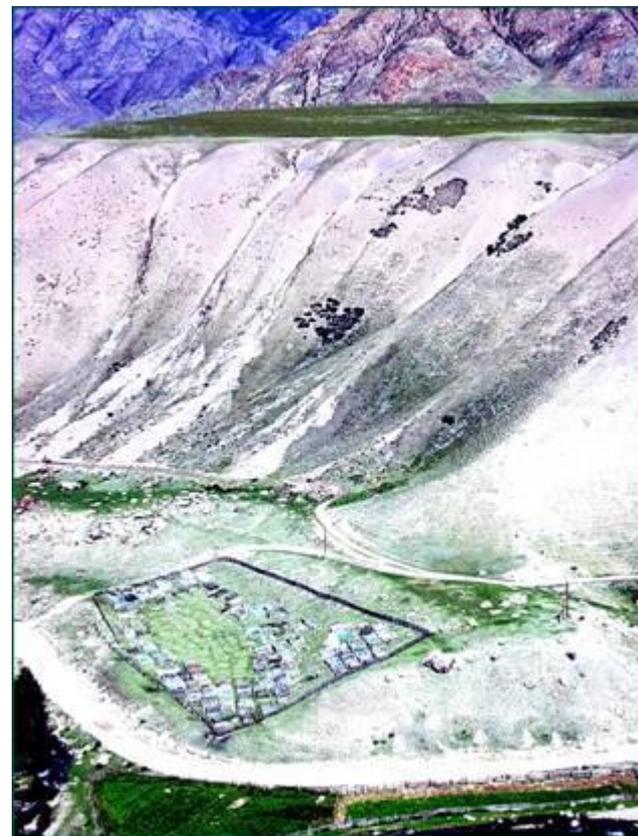
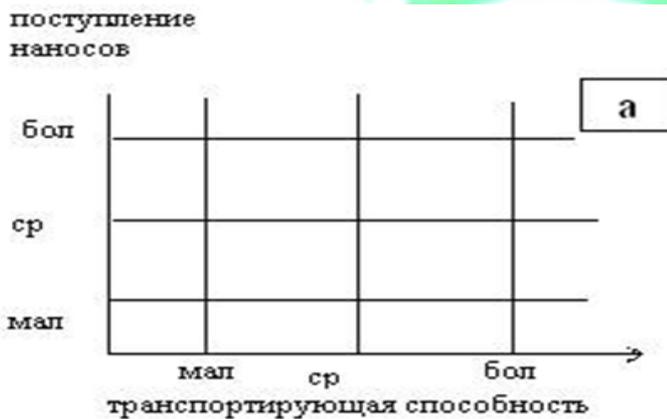
При этом главная роль обычно принадлежит взвешенным наносам.



Считается, что на долю влекомых наносов приходится в среднем лишь 5–10% стока взвешенных наносов рек, причем с увеличением размера реки эта доля, как правило, уменьшается.

Транспортирующей способностью потока $R_{тр}$.

Предельный суммарный расход как взвешенных, так и влекомых наносов, которые может при данных гидравлических условиях переносить река, называют транспортирующей способностью потока $R_{тр}$.

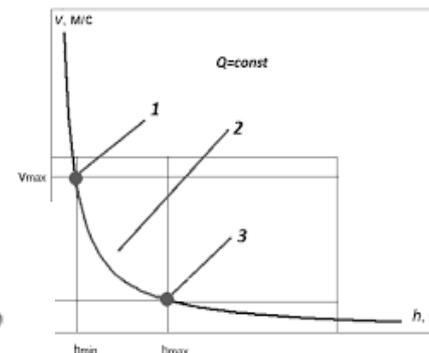


Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям

$R_{тр}$ зависит прежде всего от:

- скоростей течения;
- расхода воды:

$$R_{тр} = s_{тр} Q = k \frac{V^3}{gh_{cp} w} Q,$$

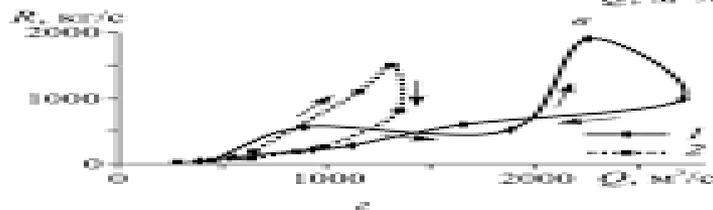
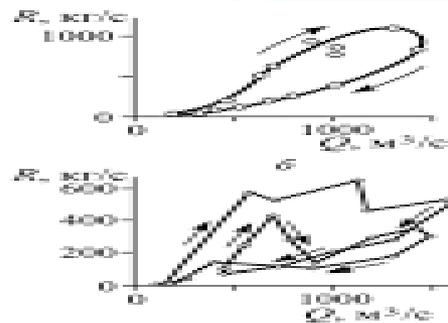
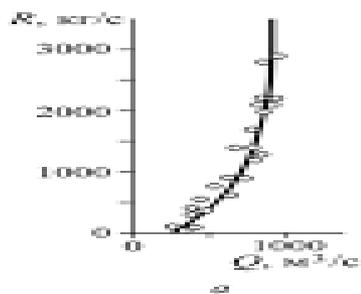


где $S_{тр}$ – концентрация наносов (мутность воды), соответствующая транспортирующей способности потока,

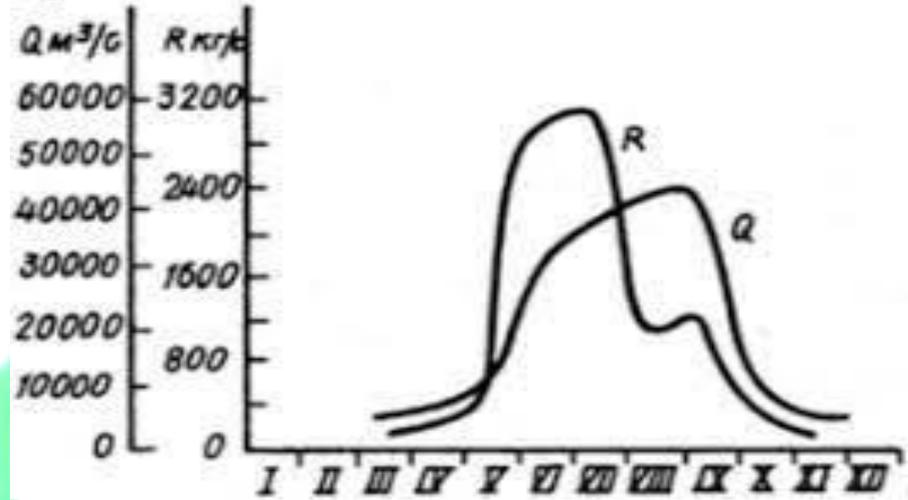
V – средняя скорость потока, h_{cp} – его средняя глубина,
 w – средняя гидравлическая крупность частиц наносов.

<https://znanio.ru/media/sovremennye-ruslovyie-protsessy-2714766>

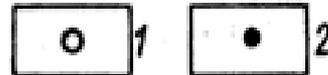
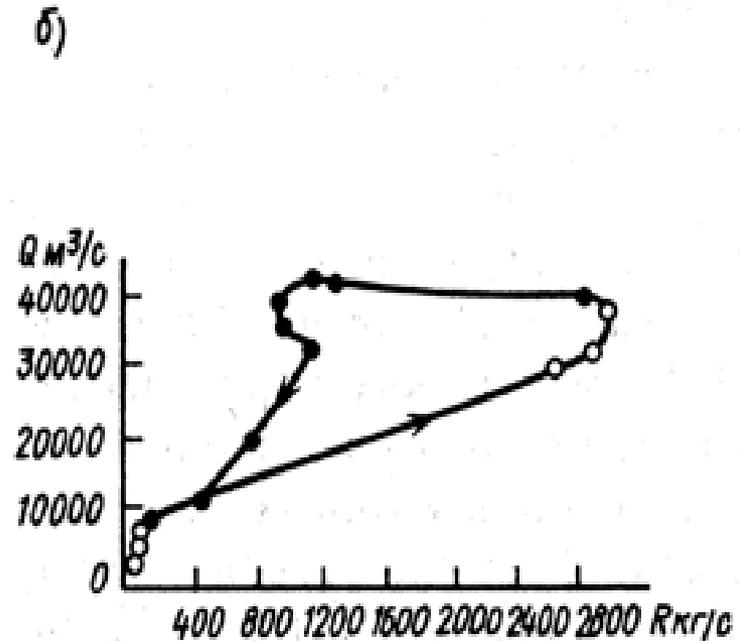
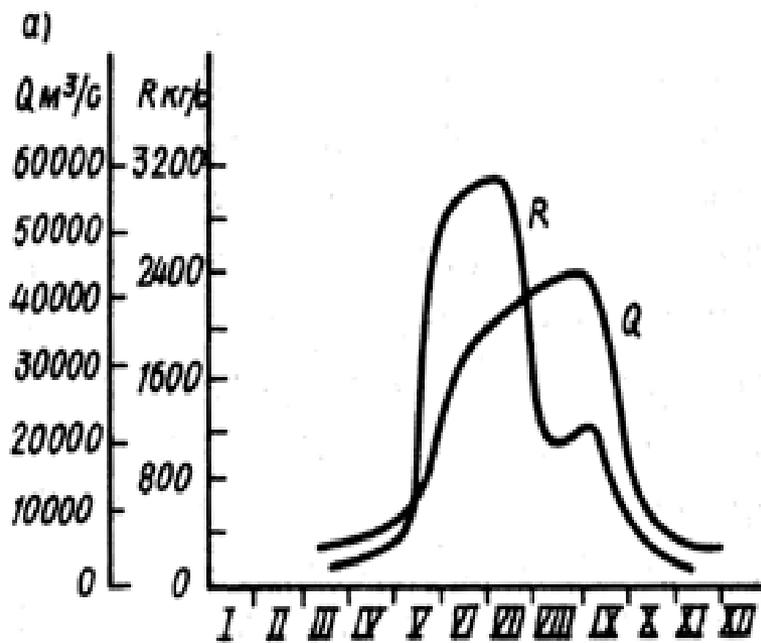
Сток наносов реки (прежде всего взвешенных наносов) обычно рассчитывают по построенным на основе измерений связям расхода воды и расхода взвешенных наносов $R = f(Q)$.



a)



Типичные графики изменения расходов воды и взвешенных наносов (а) и связи между ними (б)
 1 – подъем половодья, 2 – спад половодья



С помощью графика связи $R = f(Q)$ по известным среднесуточным значениям Q легко определить и соответствующие величины R .

Сток наносов рассчитывают по формуле

$$W_{\text{н}} = \bar{R} \Delta t,$$

где $W_{\text{н}}$ в кг, средний расход наносов \bar{R} в кг/с, интервал времени Δt в с.

Сток наносов чаще удобнее представить не в килограммах, а в тоннах или даже в миллионах тонн.

В этих случаях применяют формулы

$$W_{\text{н}} (\text{T}) = \bar{R} \Delta t \cdot 10^{-3},$$

$$W_{\text{н}} (\text{млн T}) = \bar{R} \Delta t \cdot 10^{-9},$$

Если речь идет о среднегодовых величинах, то

$$W_{\text{н}} (\text{млн T}) = \bar{R} \cdot 31,56 \cdot 10^{-3}.$$

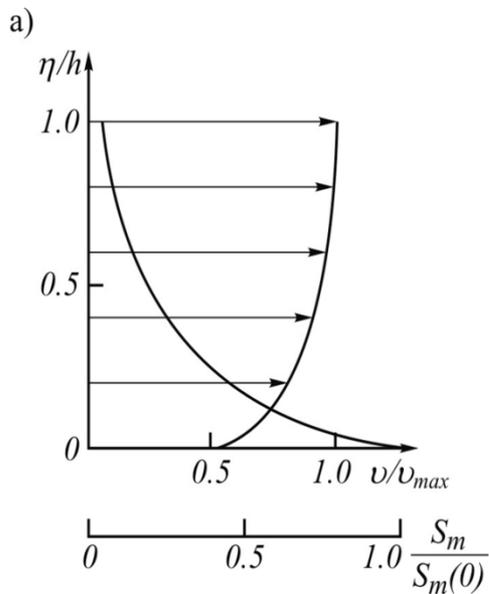
Модуль стока наносов

Модулем стока наносов называют сток наносов в тоннах с 1 км² площади водосбора:

$$M_H = W_H / F.$$

Для среднеемноголетних величин стока наносов получим M_H в т/км²:

$$M_H = \bar{R} \cdot 31,56 \cdot 10^3 / F.$$



Эпюры скоростей течения и мутности (а) и единичных расходов наносов (б)

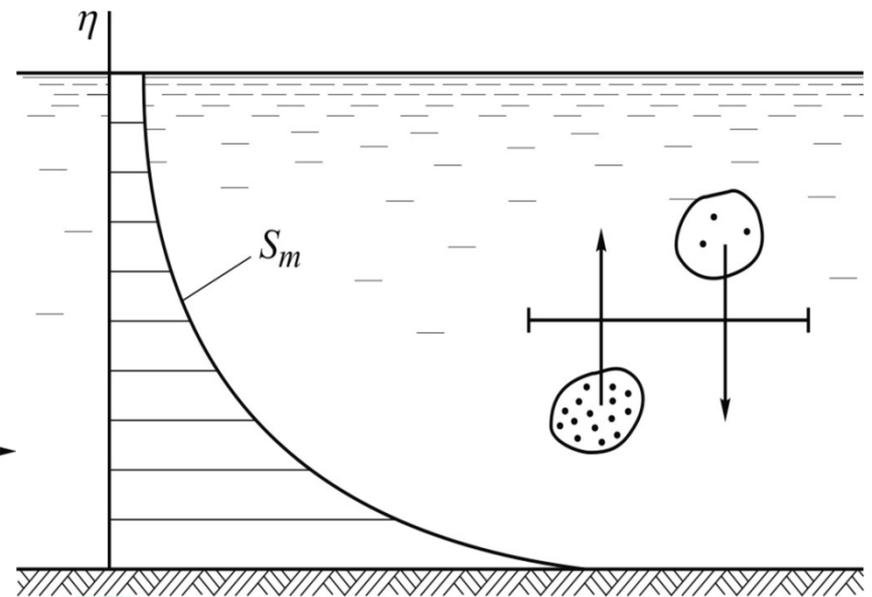
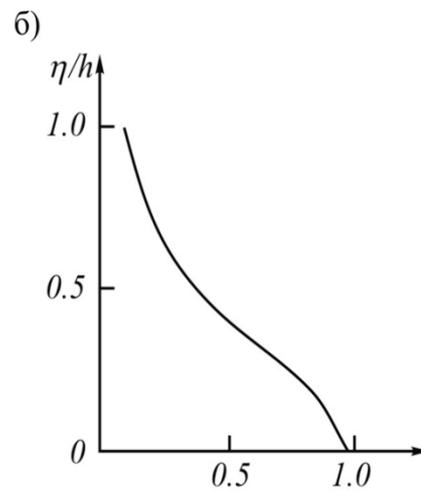
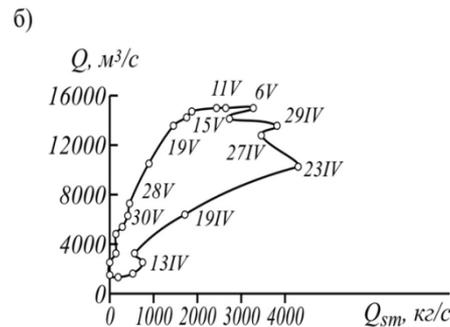
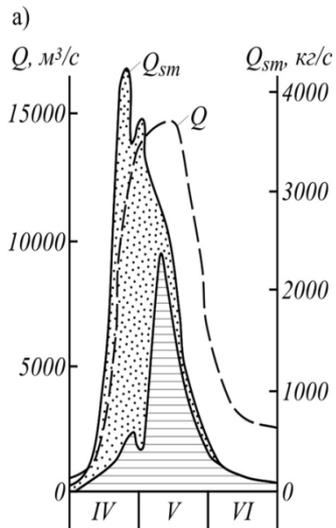
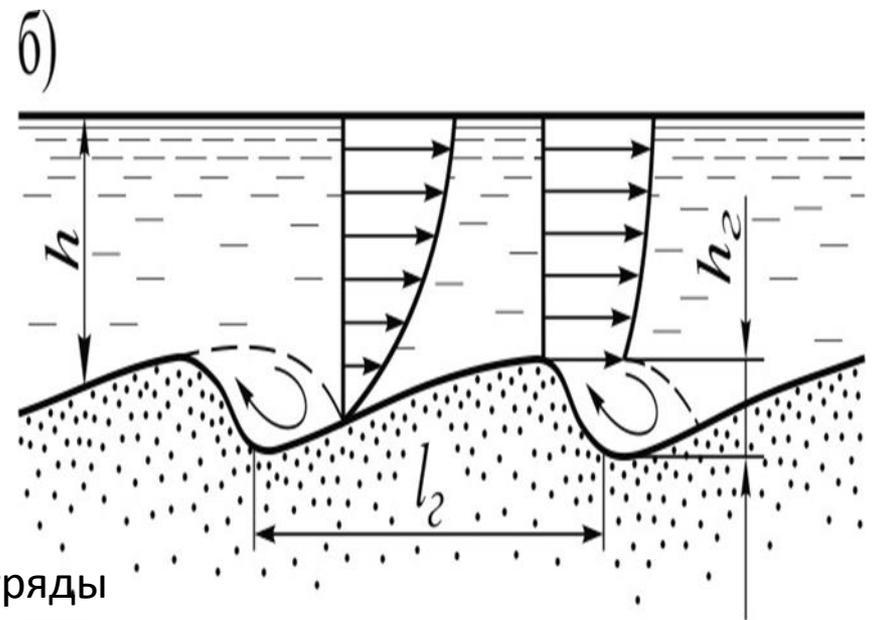
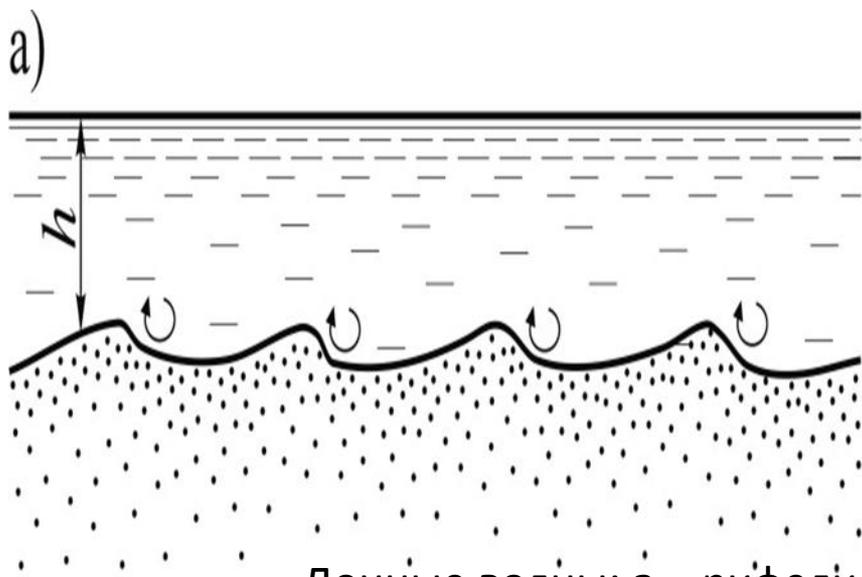


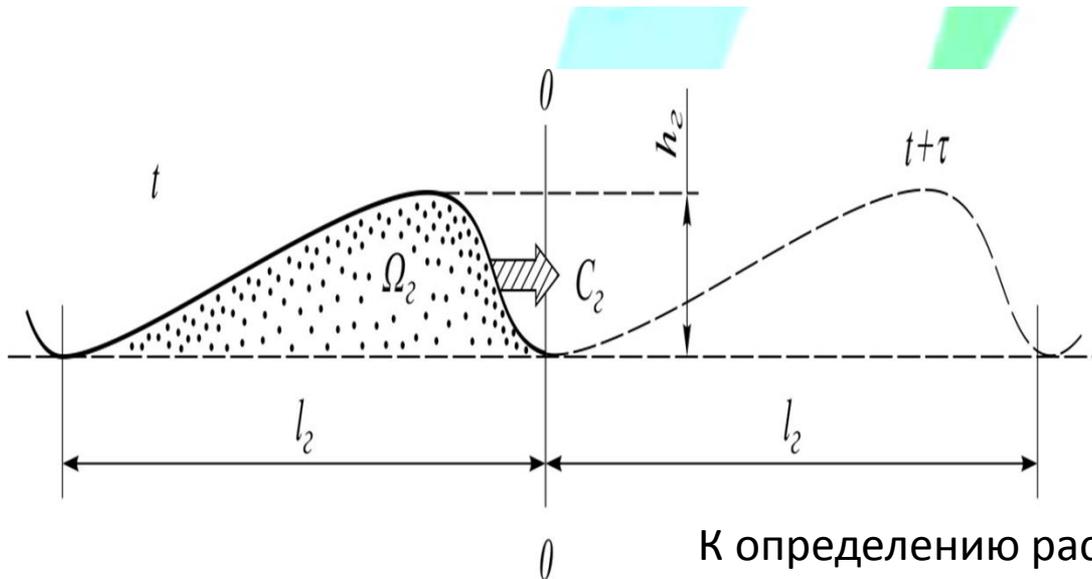
Схема диффузионного переноса частиц наносов по вертикали



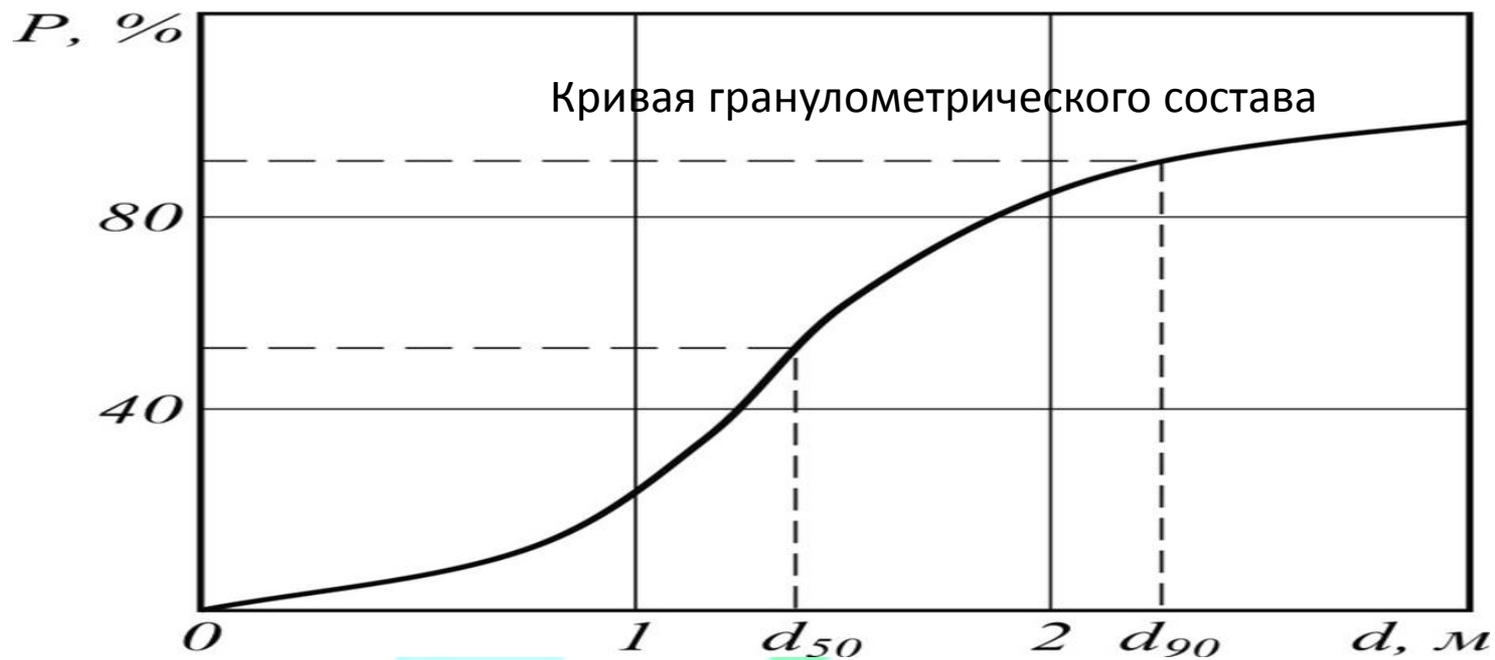
Графики колебания расходов воды и расходов взвешенных наносов (а) и график связи расходов воды и расходов наносов (б) на р. Каме у с. Соколы Горы за 1938 г. (по Г.И. Шамову)



Донные волны: а – рифели; б – гряды



К определению расхода наносов через параметры донных гряд



а)



б)



в)



Частицы наносов

Гидравлическая крупность частиц песка и мелкого гравия

$d, \text{ мм}$	$w_0, \text{ см/с, при } t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{ мм}$	$w_0, \text{ см/с, при } t, ^\circ\text{C}$						
0.10	0.44	0.51	0.59	0.66	1.0	10.50	10.67	10.84	11.00
0.20	1.54	1.71	1.88	2.04	1.5	16.10	16.27	16.44	16.60
0.50	4.90	5.07	5.24	5.40	2.0	19.00	19.00	19.00	19.00

Приборы для отбора проб воды со взвешенными наносами

Приборы, с помощью которых берут пробы воды для определения ее мутности, называют батометрами.

Различают батометры:

- мгновенного;
- и длительного наполнения.

Батометр Нискина (Shale Niskin)

Батометры мгновенного наполнения

Батометры мгновенного наполнения (батометр Н. Н. Жуковского и др.) в основном применяются при проведении научных исследований для определения мгновенных значений мутности воды.

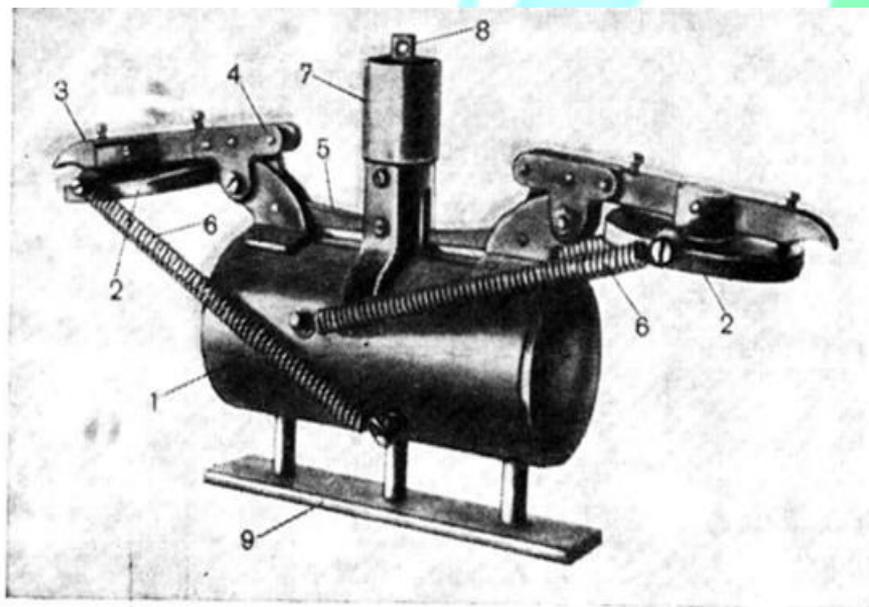


Рис. 24.1. Батометр Н. Н. Жуковского (штанговый).

1 — полый цилиндр; 2 — крышки с резиновыми прокладками; 3, 4, 5 — элементы спускового устройства; 6 — пружины; 7 — муфта для штанги;

Батометры длительного наполнения

Батометры длительного наполнения позволяют определить осредненную за период измерения мутность, учитывая ее пульсацию.

Применяют следующие типы батометров длительного наполнения:

- батометр-бутылка на штанге,
- батометр-бутылка в грузе
- и вакуумный батометр.



GP-61 (M) - Батометр вакуумный модернизированный



Батометр-бутылка GP-16



Батометр-бутылка в грузе GP-15

Приборы для отбора проб влекомых наносов

Для изучения влекомых наносов применяют специальные приборы, называемые донными батометрами.

Принцип действия их заключается в следующем:

- Прибор устанавливают на дне и на участке дна шириной, равной ширине входного отверстия прибора.
- Он улавливает наносы в течение определенного промежутка времени.
- Затем прибор поднимают, из него извлекают наносы и определяют их объем и массу.

Подразделение батометров для измерения расходов влекомых наносов

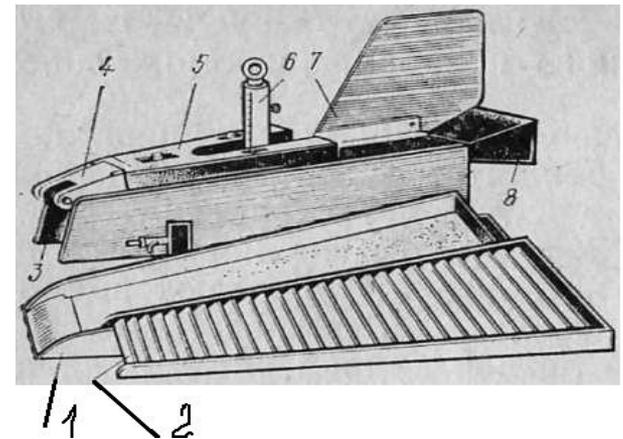
Батометры для измерения расходов влекомых наносов подразделяют на батометры :

- для мелких фракций влекомых наносов (песок, гравий)
- и для крупных фракций влекомых наносов (галька).

Для определения мелких влекомых наносов в настоящее время применяют в основном батометр «Дон»

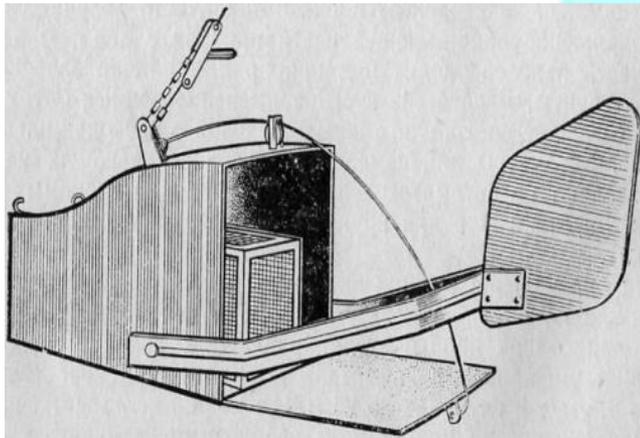
Он предназначен для отбора проб в руслах равнинных рек с песчаными и гравелистыми наносами диаметром до 10 мм при скоростях течения до 1,5 м/с и глубинах до 20 м. Им можно пользоваться и при больших скоростях, но при этом необходимо увеличивать массу груза или же применять оттяжки.

При определении расходов влекомых наносов время выдержки прибора на дне определяют опытным путем и принимают с таким расчетом, чтобы объем пробы составлял 30—500 см³ или имел массу в 50—750 г. Выдерживать прибор на дне более 10 мин не рекомендуется во избежание подмыва.



Для взятия проб крупных влекомых наносов имеется несколько разновидностей батометров.

Батометр Г. И. Шамова " представляет собой сетчатый ящик, вставляемый в металлический кожух обтекаемой формы, снабженный рулем и приспособлением для опускания и подъема.

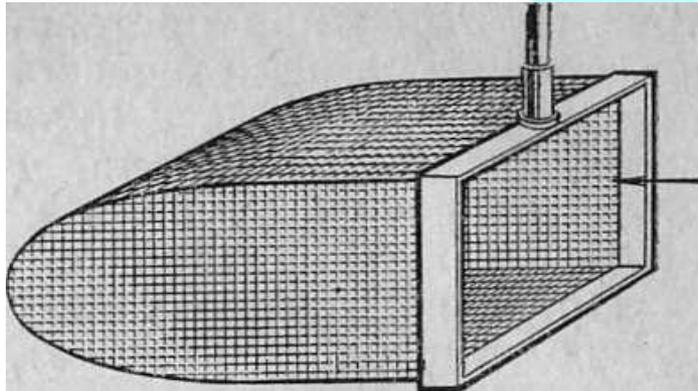


При подъеме прибора со дна выходное отверстие закрывают крышкой. Размер ячеек сетки ящика подбирают в зависимости от крупности наносов изучаемой реки. Для улавливания мелких частиц на дне сетчатого ящика имеется песколовка, перекрываемая наклонной плоскостью с прорезями (улавливает наносы до 1 см).

Продолжительность выдержки батометра на дне подбирают опытным путем.

Батометр сетка ГГИ

Батометр сетка ГГИ предназначен для учета крупной гальки, влекомой по дну. Он состоит из металлической рамы шириной 20—40 см, высотой 20 см и натянутой на нее проволочной сетки. Размер сетки выбирают в соответствии с наименьшим диаметром гальки. Прибор опускается на штанге.



Сетчатый батометр ГГИ-29, сконструированный в ГГИ, применяют для отбора проб влекомых наносов крупностью 5—100 мм, при скоростях течения потока до 4 м/с и глубинах до 2 м. Ширина входного отверстия батометра 25 см, высота 20 см.

Время выдержки батометра-сетки ГГИ и сетчатого батометра ГГИ-29 на дне потока назначают исходя из того, чтобы улавливаемые наносы занимали примерно $1/3$ его объема.



МУТНОМЕТР
MILWAUKEE
ELECTRONICS (США)
MI415 PRO...



AMTAST AMT27
ПОРТАТИВНЫЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬ
МУТНОСТИ



AMTAST AMT21
ПОРТАТИВНЫЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬ
МУТНОСТИ

Батометр Нискина (Shale Niskin)

Фракции минеральных частиц

Фракция	d, мм	Речные наносы
валуны	> 100	влекомые
галька	100-10	влекомые
гравий	10-1	влекомые
песок	1-0,1	влекомые, взвешенные
пыль	0,1-0,01	взвешенные
ил	0,01-0,001	взвешенные
глина	< 0,001	взвешенные



СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ =)

