

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра лесных культур и мелиораций

А.С. Чиндяев  
А.В. Горяева

# УЧЕНИЕ О ГИДРОСФЕРЕ

Методические указания  
к выполнению лабораторно-практических работ  
для студентов ЛХФ, обучающихся  
по направлению 511100 «Экология и природопользование»,  
специальности 020802 «Природопользование»

Екатеринбург  
2009

Печатаются по рекомендации методической комиссии ЛХФ  
Протокол № 1 от 13 января 2009 г.

Рецензент – канд. с.-х. наук доцент М.А. Маевская

Редактор Н.А. Майер  
Оператор Г.И. Романова

---

Подписано в печать 02.04.09		План. резерв
Плоская печать	Формат 60×84 1/16	Тираж 100 экз.
Заказ №	Печ. л. 3,02	Цена 10 руб. 20 коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Учение о гидросфере» одна из наиболее важных в базовой подготовке экологов-природопользователей.

Поэтому специалист должен хорошо представлять место и роль воды в природе и водных ресурсов в экономике, сущность гидрологических процессов и их вклад в формирование как природного облика всей Земли, так и отдельных ландшафтов, должен владеть системой научных знаний и методов исследований в области гидрологии, вопросами приложения гидрологических знаний к другим разделам географии.

Основные задачи дисциплины «Учение о гидросфере» в соответствии с ее официальной программой заключаются в следующем:

1. Дать представление о наиболее общих закономерностях процессов в гидросфере, показать взаимосвязь гидросферы с атмосферой, литосферой, биосферой. Познакомить студентов с основными закономерностями географического распределения водных объектов разных типов: ледников, подземных вод, рек, озер, водохранилищ, болот, океанов и морей, с их основными географо-гидрологическими особенностями.

2. Показать сущность основных гидрологических процессов в гидросфере в целом и в водных объектах разных типов с позиций фундаментальных законов физики.

3. Дать представление об основных методах изучения водных объектов.

4. Показать практическую важность географо-гидрологического изучения водных объектов и гидрологических процессов для экономики и для решения задач охраны природы.

К сожалению, учебной литературы по данной дисциплине мало, а методическая – практически отсутствует. Этими причинами обусловлена необходимость издания данной методики.

Работа подготовлена в виде отдельных индивидуальных заданий (лабораторных работ). Каждую работу предваряет необходимая для ее выполнения теоретическая база, позволяющая качественно не только выполнить работу, но и глубже осмыслить данную проблему.

Авторы полагают, что данные методические указания позволят студентам глубже изучить эту важную дисциплину, которая, несомненно, будет необходима при практической деятельности будущих специалистов.

## РАБОТА 1. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПЛАНАХ И КАРТАХ. ЗВЕНЬЯ ДРЕВНЕЙ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ

Известно, что рельеф на планах и картах изображается горизонталями. Способы изображения основных видов рельефа – холма, лощины, хребта, котловины, понижений – следующие (рис. 1).

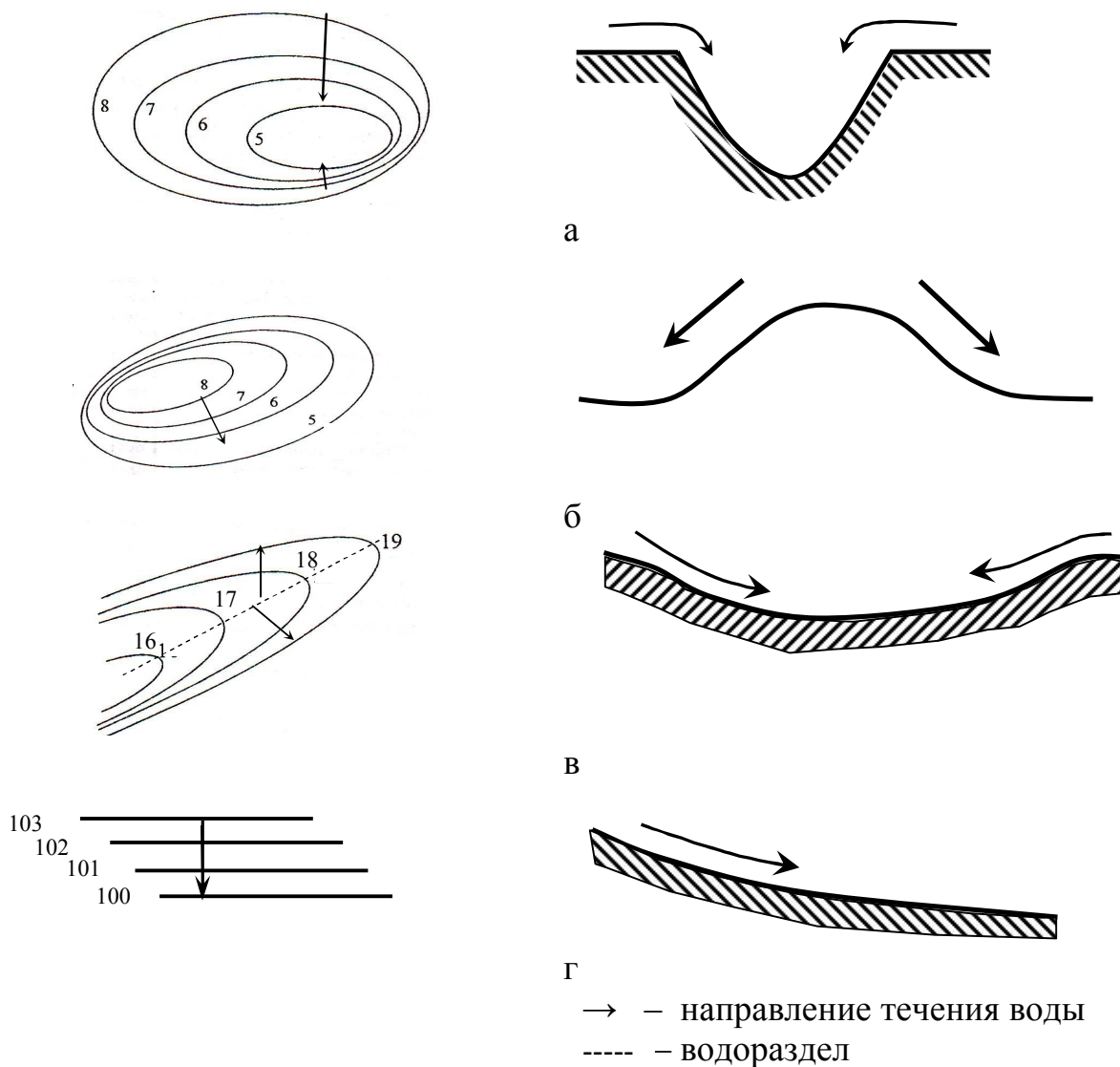


Рис. 1. Изображение рельефа местности горизонталями: а – котловина; б – холм; в – лощина; г – склон

Холм и котловина изображаются замкнутыми горизонталями (рис. 1, а, б), но у холма отметки уменьшаются от центра к периферии, а у котловины, наоборот, увеличиваются. Лощина изображается изогнутыми горизонталями (рис. 1, в), от изгиба горизонталей в обе стороны отметки увеличиваются. Спокойный склон изображается параллельными прямыми линиями (рис. 1, г).

*Гидрографической сетью* называются все понижения, по которым происходит сток воды. Она сформировалась в ледниковый период, когда огромные массы воды, образовавшиеся при таянии льда, размывали земную поверхность.

Древняя гидрографическая сеть начинается *ложбиной* (рис. 2, а). Это симметричное углубление местности небольшой протяженности и глубины (0,5 – 2,0 м) с пологими боковыми склонами. Она, постепенно углубляясь, переходит в следующее звено гидрографической сети – *лощину* (рис. 2, б), которая отличается от ложбины четко выраженной корытообразностью и большей крутизной (8 – 15°) склонов. Следующим звеном является *балка* (рис. 2, в). Это глубокое понижение местности с крутыми склонами, обычно задернованными и покрытыми растительностью. Ложбины и лощины входят в систему той или иной балки. Балка обычно входит в речную долину с постоянным речным потоком.

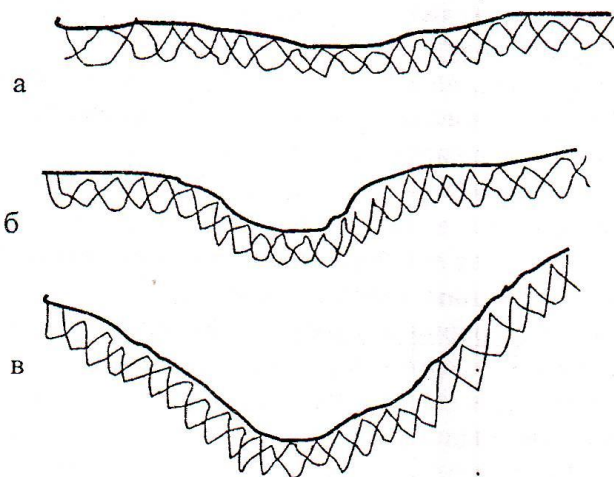


Рис. 2. Схема поперечного профиля звеньев древней гидрографической сети: а – ложбина; б – лощина; в – балка

От древней гидрографической сети следует отличать углубления, являющиеся результатом эрозии. К ним относятся промоины и овраги, которые составляют около 8 % современной гидрографической сети.

Сосредоточенный сток поверхностных вод в продольных понижениях местности приводит к размывам в нижней части ложбин, которые считаются начальной стадией оврага.

В реальных условиях сопряжение звеньев гидрографической сети выглядит следующим образом (рис. 3). Вода, поступившая в ложбину (рис. 3, I), далее поступает в лощину (рис. 3, II), преодолевая суходолы, и приходит в долину реки, а далее уже в реку.

Работа выполняется каждым студентом индивидуально по выданному заданию (выдается карта с изображением рельефа местности, имеющая масштаб и отметки горизонталей).

На выданной карте необходимо выделить имеющиеся формы рельефа, описать их, а работу оформить согласно существующим требованиям (прил. 3).

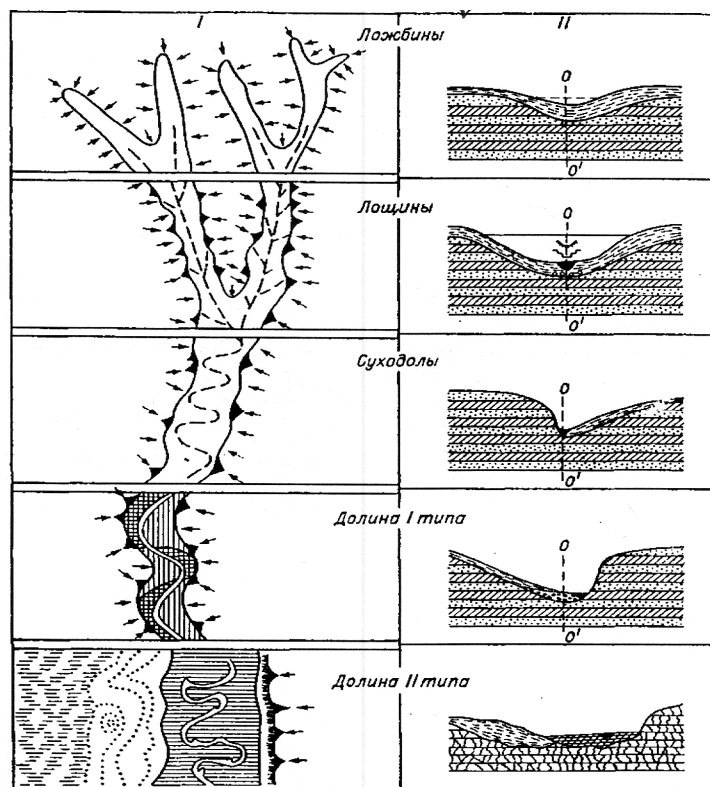


Рис. 3. Схема основных звеньев гидрографической сети: I – основные звенья сети; II – поперечные профили

## РАБОТА 2. ГИДРОЛОГИЯ РЕК

*Река* – это водоток сравнительно крупных размеров, питающийся чаще всего атмосферными осадками, стекающими с водосбора, и имеющий четко выраженное, сформированное самим потоком русло. К рекам обычно относят лишь водотоки с площадью бассейна не менее  $50 \text{ км}^2$ . Водотоки меньшего размера называют *ручьями*.

Реки – это, как правило, *постоянные водотоки*, текущие в течение всего года. Если, по образному выражению географов, вода – это кровь ландшафта, то реки – это кровеносная система ландшафта, переносящая вещество и энергию и преобразующая сам ландшафт.

### Типы рек

Реки типизируют по различным признакам, например по размеру, условиям протекания, источникам (видам) питания, водному режиму, степени устойчивости русла, ледовому режиму и т.д.

По размеру реки подразделяют на большие, средние и малые.

К *большим* обычно относят реки с площадью бассейна более  $50\,000 \text{ км}^2$ , к *средним* – в пределах  $2000 - 50\,000 \text{ км}^2$  и к *малым* – с площадью бассейна менее  $2000 \text{ км}^2$ . Нижняя граница площади бассейна ( $50 \text{ км}^2$ ), отделяющая малые реки от ручьев, весьма условна.

*Большая река* обычно имеет бассейн, расположенный в нескольких географических зонах. Гидрологический режим большой реки в целом не свойствен рекам каждой географической зоны в отдельности и поэтому *полизонален*.

*Средняя река* обычно имеет бассейн в пределах одной географической зоны. Гидрологический режим средней реки характерен для большинства рек данной географической зоны и поэтому *зонален*.

*Малая река* также имеет бассейн, расположенный в пределах одной какой-либо географической зоны, но ее гидрологический режим под влиянием местных условий может существенно отличаться от режима, свойственного большинству рек данной географической зоны, и стать, таким образом, *азональным*.

### Морфология реки и ее бассейна. Водосбор и бассейн реки

Следует различать водосбор и бассейн реки. *Водосбор реки* – это часть земной поверхности и толщи почв и грунтов, откуда данная река получает свое питание. Поскольку питание рек может быть поверхностным и подземным, различают поверхностный и подземный водосборы, которые могут не совпадать (рис. 4). *Бассейн реки* – это часть суши, включающая данную речную систему и ограниченная орографическим водоразделом.

Обычно водосбор и бассейн реки совпадают. Однако нередки случаи и их несовпадения.

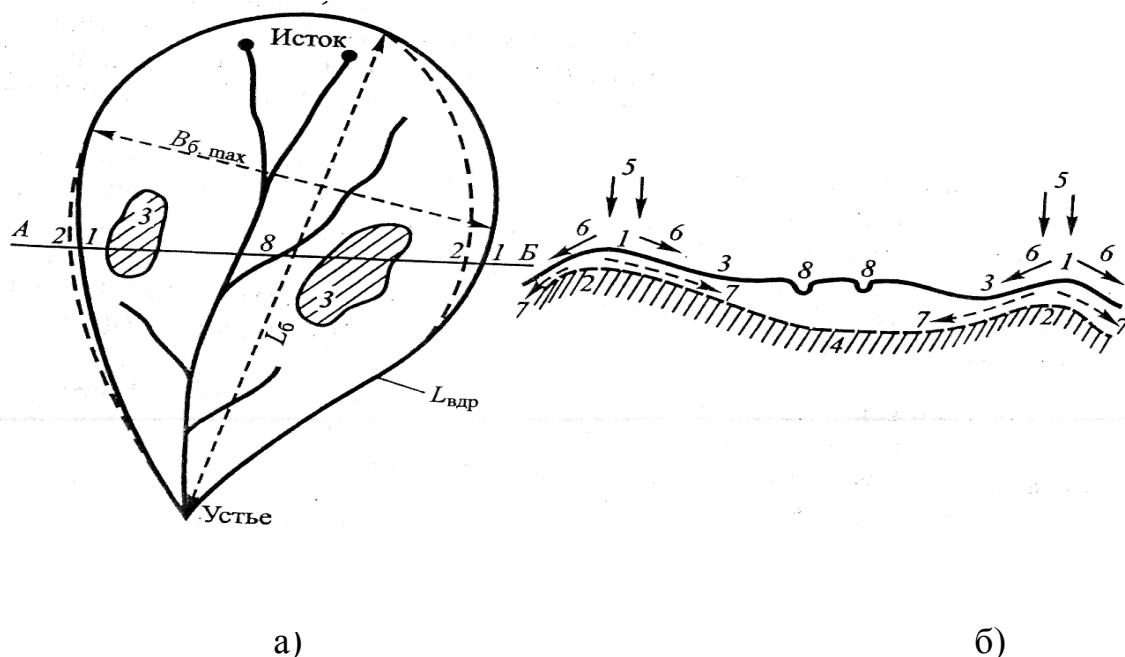


Рис. 4. Схема бассейна и водосбора реки в плане (а) и в поперечном разрезе (б) по линии А – Б:

1 – граница бассейна и поверхностного водосбора реки (орографический водораздел); 2 – граница подземного водосбора (подземный водораздел); 3 – бессточные области, не входящие в водосбор реки; 4 – водоупор; 5 – осадки; 6 – поверхностный сток; 7 – подземный сток; 8 – русла рек

Несовпадение границ бассейна, выделяемых по орографическому водоразделу, и границ водосбора может быть и в тех случаях, когда границы поверхностного и подземного водосборов не совпадают, т.е. часть подземного стока либо поступает из-за пределов данного бассейна, либо уходит за его пределы.

Бассейны (водосборы) рек, впадающих в один и тот же приемный водоем (озеро, море, океан), объединяются соответственно в бассейны (водосборы) озер, морей, океанов. Выделяют *главный водораздел земного шара*, который разделяет бассейны рек, впадающих в Тихий и Индийский океаны, с одной стороны, и бассейны рек, впадающих в Атлантический и Северный Ледовитый океаны, с другой. Кроме того, выделяют *бессточные области земного шара*, откуда находящиеся там реки не доносят воду до Мирового океана. К таким бессточным областям относятся, например, бассейны Каспийского и Аральского морей, включающие бассейны Волги, Урала, Терека, Куры, Амударьи, Сырдарьи.

### **Морфометрические характеристики бассейна реки**

Основными морфометрическими характеристиками речного бассейна (рис. 5) служат: *площадь бассейна  $F$* ; *длина бассейна  $L_b$* , обычно определяемая как прямая, соединяющая устье реки и точку на водоразделе, прилегающую к истоку реки; *максимальная ширина бассейна  $V_{bmax}$* , которая определяется по прямой, нормальной к длине бассейна в наиболее широкой его части; *средняя ширина бассейна  $V_{bcp}$* , вычисляемая по формуле

$$V_{bcp} = F/L_b,$$

где  $L_b$  – *длина водораздельной линии*.

Важной характеристикой бассейна служит распределение площади бассейна по высотам местности, представленное *гипсографической кривой* (рис. 5), показывающей, какая часть площади бассейна (в км<sup>2</sup> или %) расположена выше любой заданной отметки местности.

С помощью гипсографической кривой можно рассчитать такую важную характеристику, как *средняя высота бассейна*. Для этого площадь фигуры  $F'$ , ограниченной гипсографической кривой и осями координат, делят на площадь бассейна  $F$ . Среднюю высоту бассейна можно определить и без гипсографической кривой по формуле

$$H_{cp} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n H_i f_i,$$

где  $H_i$  – средняя высота любых высотных интервалов в пределах бассейна, вычисляемая как среднее из отметок горизонталей (изогипс), ограничивающих эти интервалы;  $f_i$  – площадь части бассейна между этими горизонталями;  $F$  – полная площадь бассейна;  $n$  – число высотных интервалов.



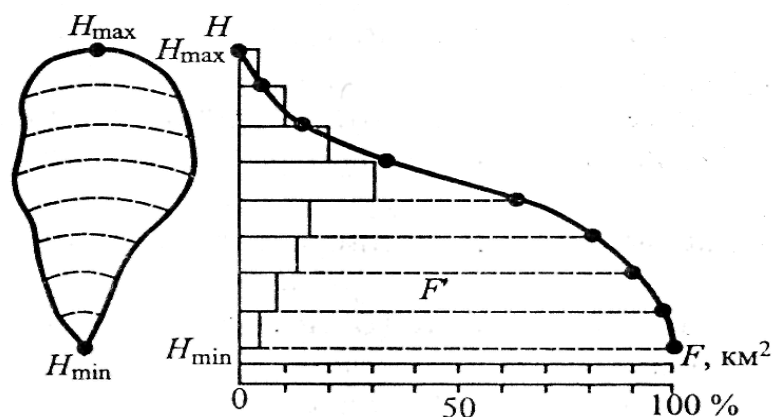


Рис. 5. Распределение площади бассейна по высотам и гипсографическая кривая

Средний уклон поверхности бассейна определяют по формуле

$$i_{\text{ср}} = \frac{\Delta H}{F} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где  $l_i$  – длины горизонталей;  $\Delta H$  – разность отметок смежных горизонталей (сечение рельефа);  $F$  – полная площадь бассейна;  $n$  – число высотных интервалов.

### Река и речная сеть

Совокупность водотоков (рек, ручьев, временных водотоков, каналов), водоемов (озер, водохранилищ) и особых водных объектов (болот, ледников) в пределах речного бассейна составляет *гидрографическую сеть бассейна*. Совокупность естественных и искусственных водотоков называют *русловой сетью*.

Частью гидрографической (и русловой) сети является *речная сеть*. Речную систему составляют *главная река*, впадающая в приемный водоем (океан, море, бессточное озеро), и все впадающие в нее *притоки* различного порядка. В качестве главной реки в разных случаях считают либо наиболее длинную реку в бассейне (Волга длиннее более полноводного притока Камы), либо наиболее многоводную реку (Миссисипи при слиянии с более длинной Миссури).

*Длина реки*  $L$  – это расстояние вдоль русла между истоком и устьем реки. Длины рек обычно определяют по крупномасштабным картам или аэрофотоснимкам (расстояния измеряют по геометрической оси русла или фарватеру). При определении длины рек по мелкомасштабным картам должны вводиться поправки на масштаб и извилистость русла.

*Исток* – это место начала реки (выход из озера, болота, ледника, родника и т. д.). Если река начинается в гористой местности там, где подземные воды выходят из-под скопления обломочного материала (осыпи), то это место считают истоком. Откуда бы река ни вытекала, ее исток не может находиться на самом орографическом водоразделе. Хотя водоток, ко-

торый дает начало реке, по своим размерам формально рекой не является (это, скорее, ручей), исток такого небольшого водотока все равно принимается за исток всей реки. Так, например, Волга – крупнейшая река Европы – берет начало в болотах Валдайской возвышенности и ее истоком считается родник, укрепленный деревянным срубом, у которого имеется надпись «Исток Волги». На первых километрах после истока Волга представляет собой небольшой ручей со слабым течением.

*Устье реки* – это место впадения реки в море, озеро, другую реку. Иногда река заканчивается там, где прекращается речной сток из-за потерь на испарение и инфильтрацию или в результате полного разбора воды на орошение.

Отношение длины участка реки  $L_i$  к длине прямой  $l_i$ , соединяющей концы этого участка, называется коэффициентом извилистости реки на данном участке:

$$k_{извi} = L_i/l_i$$

Коэффициент извилистости на отдельных участках рек изменяется от 1 до 2 – 3, а иногда и больше.

Поскольку на отдельных участках извилистость реки разная, общий коэффициент извилистости реки определяют по формуле

$$k_{изв.общ} = \sum L_i / \sum l_i.$$

Сумма длин всех рек в пределах бассейна или какой-либо территории дает *протяженность речной сети*  $\sum L_i$ , а отношение протяженности речной сети к площади бассейна характеризует *густоту речной сети* бассейна или территории (d):

$$d = \sum L_i / f,$$

где d имеет размерность км/км<sup>2</sup>, f – площадь рассматриваемой территории.

Густота речной сети в пределах равнинных территорий Европейской части России в целом уменьшается с севера на юг: в лесной зоне она составляет 0,4 – 0,6 км/км<sup>2</sup>, в степной 0,2 – 0,3, на Прикаспийской низменности уменьшается до 0,05. На Кавказе с увеличением высоты местности густота речной сети возрастает до 0,8 – 1,0, а иногда и до 2 км/км<sup>2</sup>.

Речная сеть – это сложный результат тектонических и эрозионно-аккумулятивных процессов, движения ледников, крупномасштабных колебаний уровня океана и морей и т. д.

### **Долина и русло реки**

Речные долины по происхождению могут быть *тектоническими, ледниковыми и эрозионными*.

По форме поперечного профиля они подразделяются на *теснины, ущелья, каньоны, V-образные, трапецеидальные, ящикообразные, корытообразные* и др. В поперечном профиле долины (рис. 6, а) выделяют *склоны*

долины (вместе с уступом долины и надпойменными террасами) и дно долины. В пределах дна (ложа) долины находятся *русло реки* (рис. 6, б) (наиболее низкая часть долины, занятая водным потоком в межень) и *пойма* (заливаемая водами половодья или значительными паводками часть речной долины).

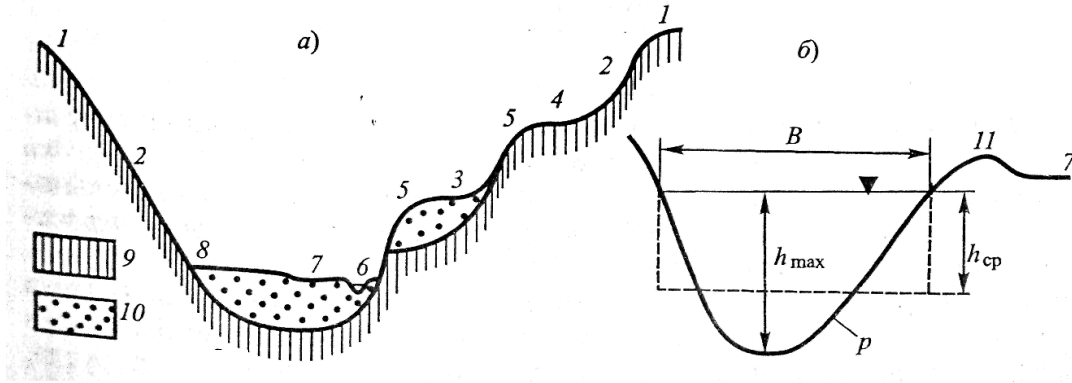


Рис. 6. Поперечный профиль долины (а) и русла (б) реки:

1 – бровка долин (коренного берега); 2 – уступ коренного берега; 3 – первая надпойменная терраса (аккумулятивная); 4 – вторая надпойменная терраса (эрозионная); 5 – бровка террасы; 6 – русло реки; 7 – низкая пойма; 8 – высокая пойма; 9 – коренные породы; 10 – аллювиальные отложения; 11 – прирусловой вал

Русла рек по форме в плане подразделяются на *прямолинейные*, *извилистые* (меандрирующие), *разделенные на рукава*, *разбросанные* (блуждающие) (рис. 7).

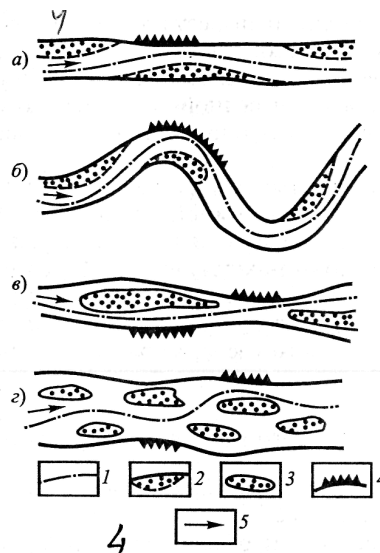


Рис. 7. Типы речных русел: а – прямолинейное; б – извилистое; в – разделенное на рукава; г – разбросанное; 1 – линия наибольших глубин; 2 – отмель; 3 – осередок или остров; 4 – размываемый участок берега; 5 – направление течения

Основные морфологические элементы русла следующие: *излучины* (меандры), затопляемые подвижные повышения дна – *осередки* и более высокие, более стабильные и закрепленные растительностью *острова*, глубокие и мелкие участки русла – *плесы и перекаты*, *донные гряды* различного размера.

Полоса в русле реки с глубинами, наиболее благоприятными для судоходства, называется *фарватером*.

### **Продольный профиль реки**

*Продольный профиль реки* – это график изменения отметок дна и водной поверхности вдоль русла. На горизонтальной оси графика откладывают расстояние по длине реки, на вертикальной – абсолютные или условные отметки дна (обычно по линии наибольших глубин) и уровня воды. Для продольных расстояний и высот обычно берут разные масштабы.

Разность отметок дна или водной поверхности реки на каком-либо ее участке называется *падением* ( $\Delta H$ ). Разность отметок истока и устья реки составляет *полное падение реки*.

В связи с тем, что у рек глубины обычно несоизмеримо меньше полного падения, графики изменения отметок дна и водной поверхности для всей реки сливаются в одну линию.

Продольные профили рек могут быть *плавновогнутыми, прямолинейными, выпуклыми, ступенчатыми* (рис. 8, а). Характер продольного профиля определяется геологическим строением и рельефом речного бассейна, а также эрозионно-аккумулятивной деятельностью самого потока.

Перегибы продольного профиля обычно приурочены к местам впадения притоков (ниже их профиль, как правило, выполаживается), а также к *местным базисам эрозии*, в качестве которых могут быть главная река для притока, пороги, водопады, проточные озера, водохранилища и др. Уровень приемного водоема (океана, моря, бессточного озера), куда впадает река, называют *общим базисом эрозии*.

Весьма характерен продольный профиль реки на коротком ее участке, включающем плесы и перекаты (рис. 8, б). В этом случае продольный профиль строят отдельно для дна и водной поверхности реки. Из данных рис. 5, б видно, как изменяется продольный профиль водной поверхности с изменением уровня воды в реке. При низких уровнях (в межень) продольный профиль водной поверхности более крутой на перекатах и более пологий на плесах. При высоких уровнях (в половодье) продольный профиль обычно выравнивается или даже становится на плесах более крутым, чем на перекатах.

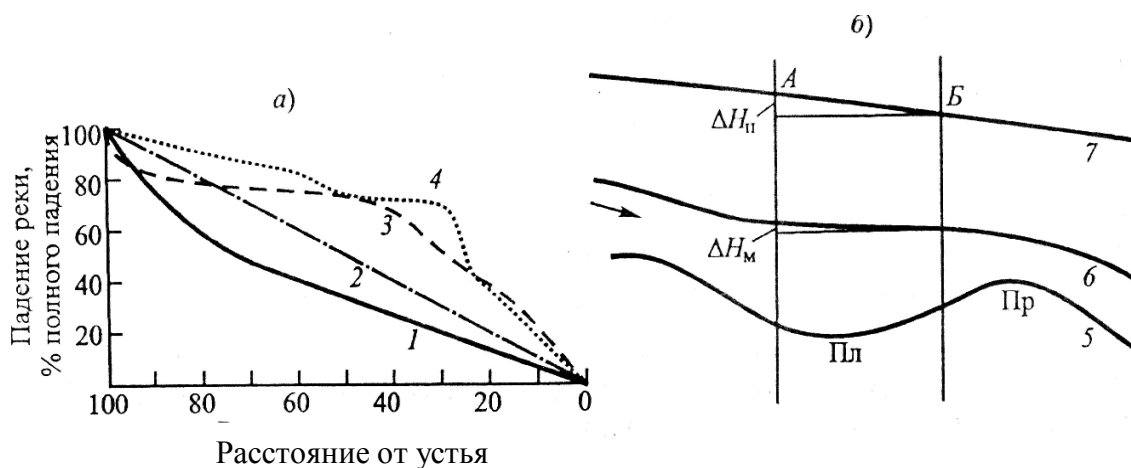


Рис. 8. Продольные профили реки (а) и ее участка (б):  
 1 – плавновогнутый (р. Вахш); 2 – прямолинейный (р. Зеравшан); 3 – выпуклый (р. Гунт); 4 – ступенчатый (р. Бартанг); 5 – дно реки; 6 – водная поверхность в межень; 7 – водная поверхность в половодье;  $\Delta H_m$  – падение между створами А и Б в межень;  $\Delta H_p$  – то же в половодье; Пл – плес; Пр – перекат

Для характеристики крутизны продольного профиля рек используют понятие *уклон реки* (отдельно для дна и водной поверхности). Уклон реки вычисляют по формуле

$$I = \Delta H_i / L_i,$$

где  $\Delta H$  – падение,  $L_i$  – длина реки на участке. Длину измеряют вдоль русла, и поэтому  $I$  представляет собой не тангенс, а угол наклона дна или водной поверхности к горизонту. Величина  $I$  для водной поверхности реки всегда положительна (исключения – лишь устья рек, подверженных действию приливов и нагонов), а для дна (в этом случае вместо  $I$  обычно пишут  $I_0$ ) может на некоторых участках принимать и отрицательные значения, например в месте резкого уменьшения глубин на перекате. Уклон реки  $I$  – величина относительная и ее выражают или в долях единицы, или ‰, или ‰‰. Во многих случаях гидрологи используют также такое понятие, как падение на 1 км длины реки: величину падения уровня  $\Delta H$ , выраженную в сантиметрах, делят на длину участка русла в километрах. Эту величину называют *километрическим падением*.

Для выполнения этой работы каждый студент получает задание (карту в масштабе с изображением реки) и по изложенной выше информации определяет все морфологические и морфометрические характеристики реки и ее бассейна (водосбора).

### РАБОТА 3. ГИДРАВЛИКА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

*Гидравлика* изучает законы равновесия и движения жидкостей. На законах гидравлики основано решение многочисленных инженерных и гидрологических задач, расчеты каналов, гидротехнических сооружений, водопроводов, движение речных потоков и др.

#### Гидростатическое давление

*Гидростатикой* называют раздел гидравлики, рассматривающий законы равновесия жидкости и ее взаимодействие с твердыми телами.

Покоящаяся в любом сосуде жидкость оказывает давление на дно и стенки сосуда. Среднее давление  $P_{\text{ср}}$ , оказываемое силой  $P$  на единицу площади  $w$ , определяется соотношением

$$P_{\text{ср}} = P / w.$$

Предел этого отношения при стремлении площадки к нулю выражает гидростатическое давление в данной точке:

$$P = \Delta P / \Delta w.$$

Гидростатическое давление действует во всех направлениях одинаково. Любое изменение давления в покоящейся жидкости передается одинаково во все точки занятого жидкостью пространства (закон Паскаля).

Давление воды на плоское горизонтальное дно сосуда (без учета атмосферного давления):

$$P = fh\gamma,$$

где  $P$  – давление на дно;  $f$  – площадь дна;  $h$  – глубина воды (расстояние от поверхности воды до дна);  $\gamma$  – удельная масса воды.

Полное (абсолютное) гидростатическое давление  $P_a$  в любой точке покоящейся жидкости равно весу столба жидкости над данной точкой (площадкой) плюс внешнее давление  $P_0$  на свободную поверхность жидкости. Атмосферное давление равно столбу жидкости высотой 10 м:

$$P_a = P_0 + \rho gh,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободно падающего тела;  $h$  – глубина погружения точки, для которой определяется давление.

В системе СИ единицей давления является Паскаль (Па). Атмосферное давление в инженерных расчетах принимается (в системе СИ) равным 98000 Па (округленно 100000 Па, или 100 кПа), во внесистемных единицах  $1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2$ .

Поскольку гидростатическое давление в жидкости действует во всех направлениях одинаково, то все точки на определенной глубине испытывают одинаковое давление. Это давление передается и на расстояние. Для измерения давления присоединим к сосуду на уровне точки  $A$  (рис. 9) тонкую стеклянную трубку (пьезометр) с открытым концом. Жидкость поднимется по трубке и остановится на уровне жидкости в сосуде. Высота  $h_1$  называется *пьезометрической* высотой, величина  $h$ , равная  $h_1$  – пьезометрическим (гидростатическим) напором.

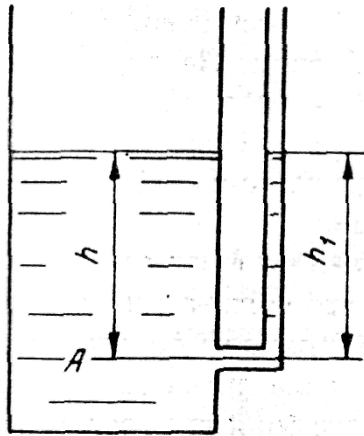


Рис. 9. Схема формирования пьезометрического напора

### Классификаций видов движения воды

Свойство текучести обуславливает постоянное движение воды в природных объектах: внешние и внутренние силы перераспределяют ее во времени и пространстве. Двигается и лед, обладающий пластичностью.

Движение воды классифицируется по изменению гидравлических характеристик водного потока во времени и пространстве, по гидродинамическому режиму (ламинарное, турбулентное), по состоянию водной поверхности (спокойное, бурное), а также по действующим физическим силам.

Движение воды считают *установившимся* (стационарным), если скорость течения во времени не изменяется, и *неустановившимся* (нестационарным), если скорость течения во времени – величина переменная.

Установившееся движение, в свою очередь, подразделяют на *равномерное*, если скорость течения вдоль потока остается неизменной, и *неравномерное*, если скорость течения вдоль потока изменяется.

Выделяют два гидродинамических режима движения воды: *ламинарный* и *турбулентный*. Слово «ламинарный» происходит от латинского слова, означающего «слоистый», слово «турбулентный» – от латинского слова, означающего «беспорядочный». При ламинарном режиме частицы воды движутся по параллельным траекториям без перемешивания; при турбулентном режиме их движение имеет хаотический характер, в потоке формируются вихри и активизируются процессы перемешивания воды, скорости течения непрерывно изменяются по величине и направлению. Ламинарный режим может переходить в турбулентный при увеличении скорости течения.

Гидродинамический режим потока характеризуется безразмерным числом *Рейнольдса*  $Re$ :

$$Re = \frac{vh}{\nu},$$

где  $v$  средняя скорость течения, м/с;  $h$  – глубина потока или толщина слоя воды, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, зависящий от характера жидкости и ее температуры, м<sup>2</sup>/с.

Критическое значение числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , соответствующее *переходу* от ламинарного к турбулентному режиму, лежит приблизительно в диапазоне от 300 до 3000.

Если фактическое число Рейнольдса в водном потоке больше 3000 – режим турбулентный, меньше 300 – ламинарный, в диапазоне  $Re$  от 300 до 3000 – переходный.

В реках, озерах, морях и океанах число  $Re$  всегда значительно больше критического значения, и режим движения воды турбулентный. Ламинарный режим характерен для подземных вод в мелкозернистых грунтах (вследствие малых размеров пор и малых скоростей движения воды) и для ледников (вследствие очень большой вязкости льда и очень малых скоростей его движения).

От гидродинамического режима зависит внутреннее трение в потоке и вертикальное распределение скоростей течения.

По состоянию водной поверхности потоки делят на *спокойные* и *бурные*. Спокойные потоки имеют плавную форму водной поверхности, препятствия обтекаются ими также плавно. Бурные потоки имеют неровную форму водной поверхности со стоячими волнами, в местах препятствий образуются резкие перепады уровня. Бурные потоки характерны для горных рек, спокойные – для равнинных рек и течений в водоемах.

Нельзя отождествлять бурные и турбулентные, спокойные и ламинарные потоки, так как характеристики этих движений воды качественно различные. Спокойные потоки, например, могут быть как ламинарными, так и турбулентными, бурные – всегда турбулентные.

#### Гидравлические характеристики водного потока

Различают следующие характеристики водного потока: горизонты (уровни), живое сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус (рис. 10).

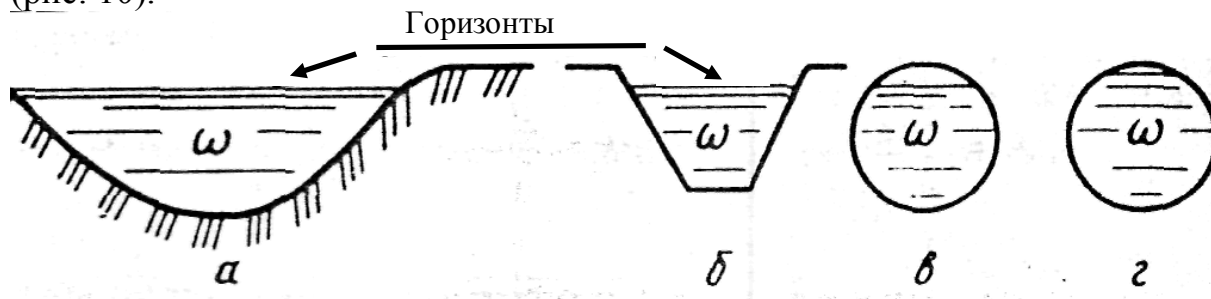


Рис. 10. Живое сечение потока: а – в реках; б – в каналах; в, г – в трубах

*Уровнем* или *горизонтом* называют уровень воды в водном объекте относительно постоянной горизонтальной поверхности.



*Живым сечением потока* ( $w$  – омега, м<sup>2</sup>) называется площадь поперечного сечения потока, нормальная к направлению движения воды.

*Смоченным периметром* ( $\chi$  – кси, м) называется длина линии соприкосновения воды со стенками и дном потока на его поперечном разрезе.

*Гидравлическим радиусом* ( $R$  – эр, м) называется отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{w}{\chi}.$$

При напорном движении в круглой трубе гидравлический радиус равен четверти диаметра трубы:

$$R = \frac{w}{\chi} = \frac{\pi d^2}{4}; \quad \pi d = \frac{d}{4}.$$

*Объем воды* ( $Q$  – ку), протекающей в единицу времени через живое сечение потока, называется *расходом* и определяется по формуле

$$Q = wv,$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $w$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  $v$  – средняя скорость течения воды, м/с.

**Равномерное движение воды в открытых руслах.** Основное уравнение равномерного движения имеет вид

$$\tau/V = Ri,$$

где  $\tau$  – сопротивление течению воды, отнесенное к единице площади поверхности дна и берегов, смачиваемых водой;  $V$  – вес единицы объема воды;  $R$  – гидравлический радиус;  $i$  – гидравлический уклон, равный пьезометрическому.

Шези принял

$$\tau/V = bv^2$$

где  $v$  – средняя скорость течения;  $b$  – коэффициент сопротивления русла; зависит от шероховатости, размеров и формы живого сечения.

Вместо этих двух формул можно написать

$$i = (bv^2)/R.$$

Следовательно,

$$v = \sqrt{1/b} \sqrt{Ri}.$$

Обозначим  $\sqrt{1/b} = C$ , тогда

$$v = C\sqrt{Ri},$$

где  $v$  — средняя скорость потока;  $R$  – гидравлический радиус;  $i$  – уклон поверхности воды или дна потока;  $C$  – скоростной коэффициент Шези.

Тогда расход воды при равномерном движении выразится зависимостью:

$$Q = wv = wC\sqrt{Ri}.$$

Для определения скоростного коэффициента применяются формулы академика Н.Н. Павловского и проф. И.И. Агроскина.

1. Формула Н.Н. Павловского:

$$C = (1/n)R^y,$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла, величина которого зависит от его состояния (см. ниже);  $R$  – гидравлический радиус русла;  $y$  – переменный показатель степени, зависящий от  $n$  и  $R$ ; определяется по формуле

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,10).$$

2. Формула И.И. Агроскина:

$$C = 1/n + 17,72 \lg R.$$

Характеристика русла	Коэффициент шероховатости $n$
Каналы с толстым илистым слоем .....	0,018
Каналы в плотном грунте, частично затянутые илистой пленкой .....	0,022
Земляные каналы в средних условиях и булыжная мостовая .....	0,025
Земляные каналы в условиях ниже средних .....	0,028
Земляные каналы в сравнительно плохих условиях (водоросли, булыжник и гравий по дну), заросшие травой, с обвалами откосов, и река в благоприятных условиях течения...	0,030
Каналы в весьма плохих условиях .....	0,035
Реки и поймы очень заросшие, с глубокими промоинами и слабым течением .....	0,080
Строганные и нестроганные доски .....	0,010 – 0,012
Гончарные и керамиковые трубы .....	0,012
Асбоцементные трубы .....	0,011
Деревянные и дощатые трубы .....	0,015

Из формулы Шези видно, что скорость движения воды в водотоках зависит не только от уклона дна, но в такой же степени и от гидравлического радиуса  $R$ . Чем больше водоток, тем больше  $R$  и больше скорость. Поэтому на больших реках и при малых их уклонах скорости больше. На неглубоких, но широких водотоках гидравлический радиус приблизительно равен глубине воды, а смоченный периметр – ширине потока. Например, при движении воды по поверхности  $R$  можно принимать равным толщине слоя стекающей воды. Чем больше этот слой, тем больше скорость движения воды по поверхности.

Пользуясь формулой Шези, можно определять не только скорость, но и размеры поперечных сечений проектируемых каналов и других водотоков, поэтому она имеет большое практическое значение.

Например, рассмотрим такие данные:

$w, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$
8	4	2
4	2	2
10	5	2

Тогда скорость, согласно формуле  $v = C\sqrt{Ri}$ , для данных условий будет одинаковой, так как  $R$  не изменяется, хотя значения  $w$  и  $\chi$  разные.

### Гидравлические сопротивления и потеря напора

При движении жидкости в реках, каналах, лотках, трубах и т.п. происходят затраты энергии потока на преодоление сопротивлений движению, вызывая потери напора, возникающие при движении жидкости. Гидравлические сопротивления можно разделить на два вида: сопротивления по длине потока и местные сопротивления. *Сопротивления по длине потока* обуславливаются силами трения о дно и стенки русла и зависят от длины потока и шероховатости русла. *Местные* сопротивления вызываются местными препятствиями течению воды (поворотом русла, резким его расширением или сужением и др.). В соответствии с видами потерь напора выделяются два вида сопротивлений: по длине потока  $h_{дл}$  и местные  $h_{м}$ .

Общие потери напора  $h_{тр}$  равны их сумме:

$$h_{тр} = h_{дл} + h_{м}.$$

Все потери напора (местные и по длине) в общем виде определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_{тр} = \zeta_{тр} \frac{v^2}{2g},$$

где  $\zeta_{тр}$  – коэффициент, показывающий долю скоростного напора, затраченного на преодоление данного сопротивления;  $v$  – скорость движения потока.

Потери напора по длине определяют по формуле

$$h_{дл} = \zeta_{дл} \frac{v^2}{2g}.$$

Местные потери определяют по формуле

$$h_{м} = \zeta_{м} \frac{v^2}{2g}.$$

Коэффициент сопротивления по длине определяют по формуле

$$\zeta_{дл} = \lambda \frac{L}{4R},$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трению по длине;  $L$  – длина рассматриваемого участка;  $R$  – гидравлический радиус.

При равномерном движении воды в открытых руслах, характеризующих равными глубинами в рассматриваемых сечениях, имеем:

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma}; v_1 = v_2; \frac{a_1 v_1^2}{2g} = \frac{a_2 v_2^2}{2g}.$$

Потери напора происходят только по длине потока  $h_{дл}$  и равны разности геометрических высот. В этом случае уравнение Бернулли примет вид

$$h_{дл} = Z_1 - Z_2.$$

Обозначив расстояние между рассматриваемыми сечениями через  $L$ , найдем потери напора на единицу длины пути движения воды:

$$\frac{h_{\text{от}}}{L} = \frac{Z_1 - Z_2}{L}.$$

Отношение  $h_{\text{от}}/L$  равно гидравлическому уклону  $i$ .

Потери напора по длине потока зависят от скорости  $v$ , гидравлического радиуса  $R$ , шероховатости стенок (русла), в которых движется поток, его длины  $L$  и плотности жидкости и определяется по формуле:

$$h_{\text{от}} = \frac{\lambda L}{4R} \frac{v^2}{2g}.$$

Подставляя значение  $i = \frac{h_{\text{от}}}{L}$  в формулу, получим

$$i = \frac{\lambda L}{4R} \frac{v^2}{2g},$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{Ri}.$$

Обозначив выражение  $\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ , характеризующее потери энергии на преодоление сил трения по длине потока через  $C$ , получим формулу Шези:

$$v = C \sqrt{Ri},$$

где  $v$  – средняя скорость потока;  $R$  – гидравлический радиус;  $i$  – уклон поверхности воды или дна потока;  $C$  – скоростной коэффициент.

Для выполнения работы каждый студент получает индивидуальное задание, по которому описывает все гидравлические характеристики потока и определяет их значение.

*Пример*

Дано:

$w$  = удвоенному числу букв в фамилии ( $\text{м}^2$ ).

$\chi$  = числу букв в фамилии минус единица ( $\text{м}$ ).

$C$  = удвоенному значению  $w$ .

$i = 0,005$ .

Определить:

$R = ?$

$v = ?$  (по формуле Шези)

$Q = ?$  ( $\text{м}^3/\text{с}$  и  $\text{м}^3/\text{сутки}$ ).

## РАБОТА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ ПО ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ, ОПРЕДЕЛЕННОЙ ПОПЛАВКАМИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ ВОДОСЛИВАМИ

### 1. Определение расхода воды по поверхностной скорости, определенной поплавками

Расходом воды, как уже было сказано, называется объем воды, протекающий через живое сечение водотока в единицу времени.

$$Q = wv,$$

где  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$  или  $\text{л}/\text{с}$ ;

$w$  – площадь живого сечения потока,  $\text{м}^2$ ;

$v$  – средняя скорость течения воды,  $\text{м}/\text{с}$ .

Для определения поверхностной скорости на реке выбирают прямолинейный незаросший участок без подпора воды. На выбранном участке разбивают три створа (рис. 11). Расстояние между крайними створами должно равняться приблизительно 3 – 4-кратной ширине реки. Кроме этого, поплавок должен проходить это расстояние не менее чем за 25 с. Поплавки (не менее 10 шт.) бросают на середину реки на 1 – 2 м выше верхнего створа, где наибольшая скорость воды. Секундомером засекают время прохождения каждого поплавка через верхний и нижний створы. После этого проводят детальные промеры живых сечений на каждом створе (рис. 12) и по этим данным в масштабе чертятся поперечные сечения потока. На каждом поперечном сечении определяют живое сечение ( $w$  – омега), смоченный периметр ( $\chi$  – кси) и гидравлический радиус ( $R$ -эр).

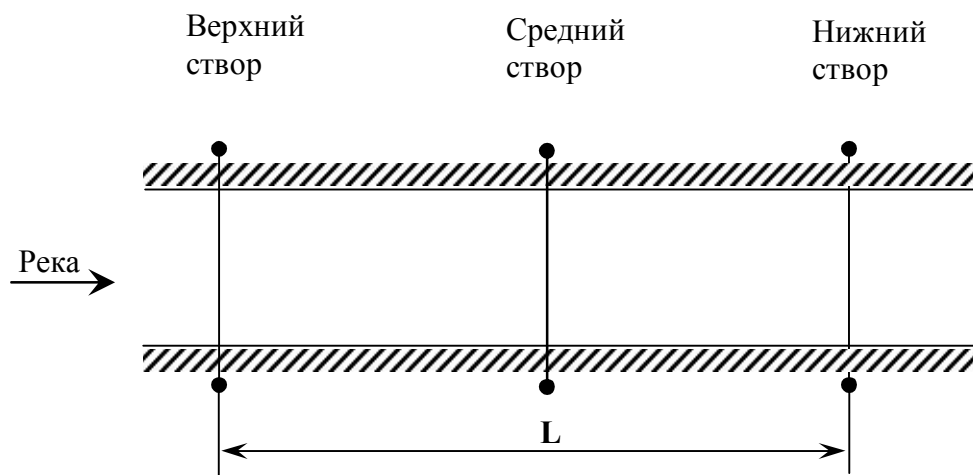


Рис. 11. Разбивка створов на реке

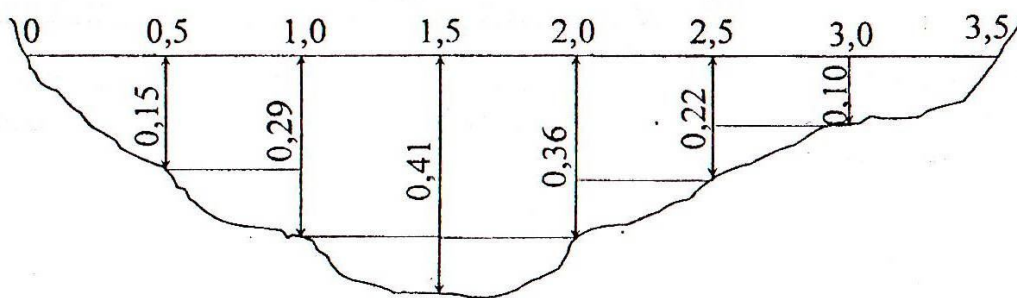


Рис. 12. Промеры живых сечений

*Пример*

Дано: Расстояние между крайними створами  $L=12$  м;  
 время прохождения поплавков расстояния  $L$ : 32, 29, 36, 30, 28, 35, 31,  
 33, 30,32 с.

Данные промеров живых сечений

		Верхний створ							
Расстояние от уреза воды, м		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Глубина воды, м		0	0,15	0,29	0,41	0,36	0,22	0,10	0

		Средний створ							
Расстояние от уреза воды, м		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	2,9	
Глубина воды, м		0	0,11	0,40	0,40	0,42	0,21	0	

		Нижний створ							
Расстояние от уреза воды, м		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Глубина воды, м		0	0,16	0,28	0,40	0,46	0,40	0,25	0

**Живое сечение** – плоскость, перпендикулярная направлению течения воды, ограниченная профилем русла и уровнем воды. В естественных водотоках живое сечение имеет обычно неправильную форму, поэтому для его определения водоток разбивают на элементарные фигуры промерами глубины через определенные расстояния, например 0,5 м (см. рис. 12).

**Смоченный периметр** – длина подводного контура поперечного сечения водного потока.

**Гидравлический радиус** – отношение площади живого сечения к смоченному периметру.

Площадь живого сечения  $w$  (омега) определяют как сумму элементарных фигур (треугольников и трапеций), а смоченный периметр  $\chi$  (кси) –

как сумму гипотенуз прямоугольных треугольников. Тогда эти параметры на створах составят следующие величины:

$$\begin{aligned} \chi_B &= 3,59 \text{ м}, & w_B &= 0,76 \text{ м}^2, \\ \chi_C &= 3,10 \text{ м}, & w_C &= 0,76 \text{ м}^2, \\ \chi_H &= 4,22 \text{ м}, & w_H &= 1,09 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

$$w = \frac{\omega_B + 2\omega_C + \omega_H}{4} = 0,84 \text{ м}^2,$$

$$\chi = \frac{\chi_B + 2\chi_C + \chi_H}{4} = 3,5 \text{ м}.$$

Среднее время  $t_{cp}$  равно среднему из двух наименьших значений времени прохождения поплавками створов:

$$t_{cp} = \frac{29 + 28}{2} = 28,5 \text{ с}.$$

Максимальная поверхностная скорость составит

$$v_{нов.} = \frac{L}{t_{cp.}} = \frac{12}{28,5} = 0,42 \text{ м/с}.$$

Для вычисления расхода воды необходимо перейти от поверхностной к средней скорости течения воды, что осуществляется через переходной коэффициент К:

$$K = \frac{C}{C + 14}.$$

Здесь  $C$  – скоростной коэффициент формулы Шези, который определяется по формуле Базена:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}},$$

где  $\gamma$  – коэффициент шероховатости, для чистых земляных русел  $\gamma = 1,30$ ;  
 $R$  – гидравлический радиус.

Тогда

$$R = \frac{w_{cp}}{\chi_{cp}} = \frac{0,84}{3,50} = 0,24 \text{ м}.$$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{1,30}{\sqrt{0,24}}} = 24,2; \quad K_1 = \frac{24,2}{24,2 + 14} = 0,63.$$

Средняя скорость ( $v_{cp}$ ) течения составит.

$$v_{cp} = 0,63 \cdot 0,42 = 0,27 \text{ м/с},$$

а расход  $Q = w_{cp} \cdot v_{нов.} = 0,84 \cdot 0,27 = 0,23 \text{ м}^3/\text{с}$   
 или  $19872 \text{ м}^3/\text{сутки}$  или  $19,87 \text{ т/сутки}$ .

(Для перевода расхода из м<sup>3</sup>/с в м<sup>3</sup>/сутки надо значение в м<sup>3</sup>/с умножить на число секунд в сутках (60х60х24 = 86400 с).

## 2. Определение расхода воды водосливами

*Водосливом* называется перегораживающее водный поток сооружение, в котором струя воды-жидкости переливается через его верхнюю кромку (рис. 13).

Для переливания воды в перегораживающей стенке устраивается вырез. Нижнее ребро выреза называется *шириной водослива* (b), а толщина его стенки – *шириной порога* (a). Часть водного потока перед водосливом называется *верхним бьефом*, за водосливом – *нижним бьефом*. Наибольшее превышение горизонта воды в верхнем бьефе над порогом водослива называют *напором* (H).

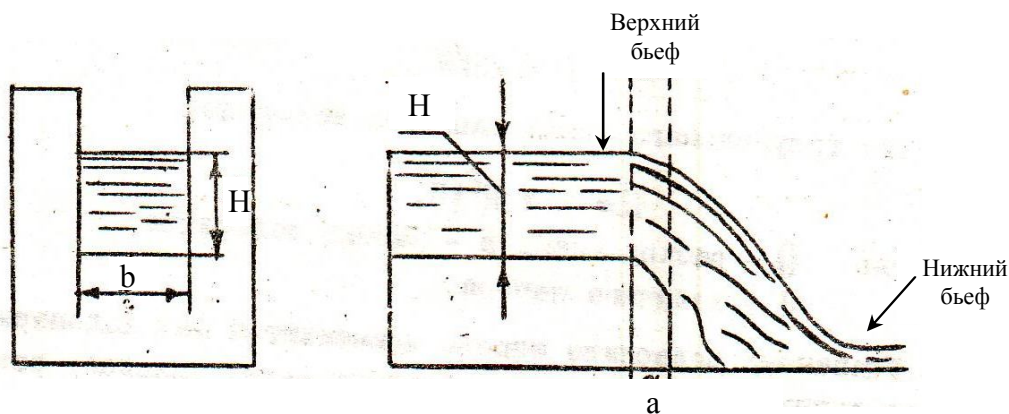


Рис. 13. Характеристика параметров водосливов: а – ширина порога (толщина стенки); b – ширина водослива; H – величина напора

По форме выреза в стенке различают водосливы прямоугольные, трапециевидальные и треугольные, а по профилю стенки – с тонкой стенкой, широким порогом, практических профилей (при плотинах).

Водослив с *тонкой стенкой* такой, у которого ребро порога острое. У водосливов с *широким порогом* толщина стенки в 2 – 3 раза больше величины напора, у водосливов *практических профилей* очертания порога совпадают с контуром падающей струи. Водосливы называют *гидрометрическими*.

По влиянию глубины воды в нижнем бьефе на пропускную способность водослива различают затопленные и незатопленные водосливы. У *незатопленных* водосливов уровень нижнего бьефа не влияет на расход воды через водослив, у *затопленных* – уровень нижнего бьефа снижает расход.

Расход воды через водосливы определяется по формулам:

для прямоугольного незатопленного водослива с тонкой стенкой

$$Q = 1,95 bH\sqrt{H} ;$$



для трапецеидального незатопленного водослива с тонкой стенкой

$$Q = 1,86 bH\sqrt{H} ;$$

для водослива с широким порогом

$$Q = 1,4 bH\sqrt{H} ;$$

для треугольного незатопленного водослива

$$Q = 1,4H^2\sqrt{H} ,$$

где  $Q$  – расход воды;  $b$  – ширина водослива;  $H$  – величина напора.

Указанные водосливы широко применяются как водомеры на оросительных, осушительных и обводнительных каналах, реках и гидротехнических сооружениях.

Каждый студент получает индивидуальное задание (прил.1, 2), выполнение которого является отчетом по работе.

## **РАБОТА 5. КРУГОВОРОТ ВОДЫ В ПРИРОДЕ И ВОДНЫЙ БАЛАНС. СТОК, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСТЫ НА РЕКАХ.**

### **1. Круговорот воды в природе и водный баланс**

Круговорот воды в природе – непрерывный, практически замкнутый процесс обращения воды на земном шаре, происходящий под воздействием солнечной радиации и силы тяжести. Основные фазы круговорота воды – *испарение воды* с поверхности океана и суши в результате солнечной радиации, *перенос* водяного пара воздушными течениями, конденсация пара и *выпадение осадков* на поверхность океана и суши, *сток* выпавших на сушу осадков в океан по поверхности земли (речной сток) и подземным путем (фильтрация) (рис. 14).

В природе существуют два непрерывных кругооборота воды – большой и малый.

Большой (мировой) кругооборот характеризуется четырьмя звеньями: испарение, перенос, осадки, сток. Малый кругооборот (внутриматериковый) характеризуется лишь двумя звеньями – испарением и выпадением осадков.

Водный баланс большой территории и за большой промежуток времени выражается упрощенным уравнением водного баланса.

$$O = I + C,$$

где  $O$  – осадки;  $I$  – испарение;  $C$  – сток (суммарный).

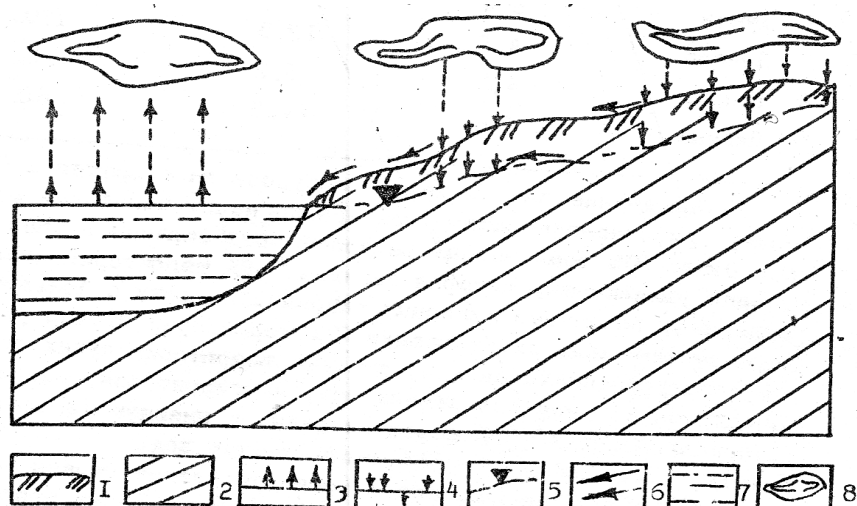


Рис. 14. Схема круговорота воды в природе:

1 – почвенно-растительный слой; 2 – породы разнообразные по составу и свойствам; 3 – испарение с поверхности океана; 4 – инфильтрация атмосферных осадков в почвенный покров; 5 – уровень подземных вод; 6 – общее направление стока поверхностных и подземных вод; 7 – океан; 8 – облака

В среднем по СССР, по многолетним данным, годовое количество осадков составляет 507 мм (100 %), испарение 310 мм (61%), сток 197 мм (39 %).

Уравнение водного баланса для небольшого участка земной поверхности и незначительного промежутка времени имеет вид:

$$O + Пп + Пг + К = С + Ф + И + Т \pm Зг \pm Зп,$$

где  $O$  – осадки;  $Пп$  – приток поверхностных вод на данный участок;  $Пг$  – приток грунтовых вод;  $К$  – конденсация водяных паров;  $С$  – сток поверхностных вод с данного участка;  $Ф$  – фильтрация (сток подземных вод);  $И$  – испарение физическое с поверхности почвы и растений;  $Т$  – транспирация растительностью;  $Зг$  – увеличение или уменьшение запаса подземных вод;  $Зп$  – увеличение или уменьшение запаса поверхностных вод.

Элементы водного баланса оказывают определяющее влияние на обеспеченность почвы влагой и на ее лесорастительные свойства. Если приходная часть водного баланса превышает расходную, то наблюдается избыток влаги в почве и требуется осушение, если же приход влаги меньше расхода – необходимо орошение.

## 2. Сток. Его характеристики и методы изучения

*Стоком* называется движение воды по поверхности земли, а также в толще почв и горных пород в процессе круговорота ее в природе. Он под-

разделяется на *поверхностный*, происходящий по земной поверхности; *склоновый*, происходящий по склонам; *почвенный*, происходящий в почвенной толще; *руслевой и речной*, происходящие по русловой и речной сети. К русловому можно отнести и сток по каналам.

**Факторы стока.** Сток воды зависит от множества природных и антропогенных факторов.

*Гидрогеология и геоморфология.* Значительное влияние на сток оказывают сложение и состав горных пород, глубина залегания водоносных и водоупорных горизонтов, направление и величина их уклона.

*Величина и форма водосборной площади.* При больших водосборных площадях, когда вода движется по длинным склонам, потери воды на испарение и глубинную фильтрацию увеличиваются. Это приводит к уменьшению стока. На сток влияет и форма водосборной площади. Если она вытянута вдоль водотока, сток происходит в более короткий срок, чем на вытянутом водосборе, примыкающем к водотоку короткой стороной.

*Климатические факторы.* К основным из них относятся атмосферные осадки, температура и влажность воздуха, а также температура испаряющей поверхности. Влияние осадков проявляется через интенсивность их выпадения. Осадки, выпадающие в виде ливней, в большей степени расходятся на сток, чем осадки слабой интенсивности. Осадки, выпадающие на сухую поверхность почвы в малых количествах, особенно в лесу, вообще не образуют стока. Осадки в виде снега накапливают воду к весне и при интенсивном снеготаянии с наступлением высоких температур воздуха образуют интенсивный сток. При низких температурах воздуха весной снеготаяние растягивается, сток происходит медленно, вследствие чего значительное количество воды расходуется на испарение и фильтрацию.

Особенно усиливается испарение при высокой температуре воздуха и малой его относительной влажности в ветреную погоду.

*Озерность и заболоченность водосборов.* Озера воздействуют на сток по двум направлениям: накапливая воды половодий и паводков и отдавая ее в межень, они выполняют роль регуляторов стока; имея значительную открытую водную поверхность с повышенным расходом влаги на испарение, озера несколько снижают сток.

Болота аккумулируют сток, поскольку моховая растительность является мощным накопителем влаги. Известно, что в единице объема сфагнового мха может аккумулироваться до 16 объемов воды. Постоянно нарастая в высоту и в стороны, болота увеличивают объем аккумулированной воды. Сток воды из болот происходит слабо, поэтому по мере роста заболоченности территории сток с нее, особенно летом, уменьшается.

*Растительность*, особенно лесная, регулирует сток. В лесных сообществах образуется лесная подстилка, обладающая большой аккумуляционной емкостью и высокой фильтрационной способностью. Поэтому лес поверхностный сток переводит во внутрипочвенный. Поскольку часть вы-

падающих над лесом осадков задерживается кронами, то средний коэффициент стока на облесенных территориях несколько снижается, однако аккумулятивная в почве вода постепенно стекает, растягивая половодье и паводки, что увеличивает питание рек в межень.

*Водохранилища*, аккумулируя воду периода половодий и паводков, позволяют обеспечивать подачу воды в реки по мере необходимости в маловодные периоды. Следовательно, водохранилища, как и озера, регулируют сток.

**Характеристики стока.** Количественно сток характеризуется объемом, модулем, коэффициентом и слоем стока.

*Объем стока*  $W_c$  (м<sup>3</sup>) – объем воды, стекающей с водосбора за определенный интервал времени. Определяется по расходу воды в водотоке (реке, ручье, канале и т. д.) за определенный период времени (сутки, месяц, год, период года и т. д.):

$$W_c = Q \cdot t,$$

где  $Q$  – средний расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $t$  – время расчетного периода.

*Модуль стока*  $q$  – количество воды, стекающей с единицы площади водосбора в единицу времени (выражается в л/с с 1 га или м<sup>3</sup>/с с 1 км<sup>2</sup>):

$$q = Q/F,$$

где  $q$  – модуль стока;  $Q$  – расход воды в водотоке, л/с;  $F$  – величина водосборной площади, га.

*Слой стока*  $h_{ст}$  – количество воды, стекающее с водосбора за определенный интервал времени, равное толщине слоя воды, равномерно распределенной по площади этого водосбора. Слой стока выражается в мм:

$$h_{ст} = W_c \cdot 1000/F,$$

где  $W_c$  – объем стока, м<sup>3</sup>;  $F$  – площадь водосбора, м<sup>2</sup>.

*Годовой слой стока* (мм/год) по модулю стока можно вычислить по зависимости

$$h_{ст} = 3154 q,$$

где  $q$  – среднегодовой (или средний за период) модуль стока, л/с с 1 га.

*Коэффициент стока*  $\sigma$  – отношение величины (объема или слоя) стока к количеству выпавших на площадь водосбора осадков, обусловивших сток:

$$\sigma = C/O,$$

где  $C$  – величина стока;  $O$  – величина осадков.

Средняя многолетняя величина стока называется *нормой стока*.

**Методы изучения стока.** В зависимости от целей существует несколько методов изучения стока. Для изучения особенностей формирования стока в зависимости от характера почвогрунтов и состояния растительности используют метод стоковых площадок.

*Стоковые площадки* устраивают на местности, имеющей уклон. Во избежание притока поверхностных вод по границам стоковых площадок устраивают оградительные канавки. Для предотвращения притока грунтовых вод на необходимую глубину врезают водонепроницаемый экран из глины или бетона (в отдельных случаях можно использовать полиэтиленовую пленку). Для регистрации стока в нижней части склона площадки устраивают сооружения для сбора воды. На стационарных стоковых площадках длительного действия для учета стока на глубине ниже поверхности почвы сооружают землянки, в которые устанавливают емкости, оборудованные самописцами, позволяющими отдельно учитывать поверхностный сток и сток с различных горизонтов почвы.

Особенности режима стока с осушенных земель и определения суммарного испарения на основе метода водного баланса изучают на небольших водосборах с помощью *гидрометрических водосливов*. Данный метод можно применять и при определении стока с малых водосборов, дренируемых естественными водотоками.

При определении стока с больших водосборов в целях выявления характеристик стока, получения расчетных модулей стока, для определения размеров проводящих каналов осушительных систем используют *гидрологические посты* на реках.

### 3. Гидрологические посты на реках

Гидрологические посты на реках решают определенные задачи гидрометрии.

*Гидрометрия* – это наука о методах и средствах определения величин, характеризующих движение и состояние жидкости и режим водных объектов.

*Уровнем* или горизонтом воды называется высота поверхности воды относительно постоянной горизонтальной плоскости.

Устройство для определения уровня воды в водотоке или водоеме называется постом. Они бывают речные и свайные.

*На речных постах* (рис. 15) устанавливают вертикальную или наклонную рейку с делениями, позволяющими замерять положение уровня воды с точностью до 1 см. Речный пост в зависимости от местных условия может состоять из нескольких реек. Нуль рейки является нулем водомерных наблюдений, отметка которого обычно известна, так как все устройства водомерного поста нивелируются.

На больших реках с пологими берегами устраивают *свайные посты*, состоящие из группы свай (рис. 16). Сваи располагаются в одном створе, перпендикулярном среднему направлению течения воды, а нумеруются по порядку, начиная с верхней.

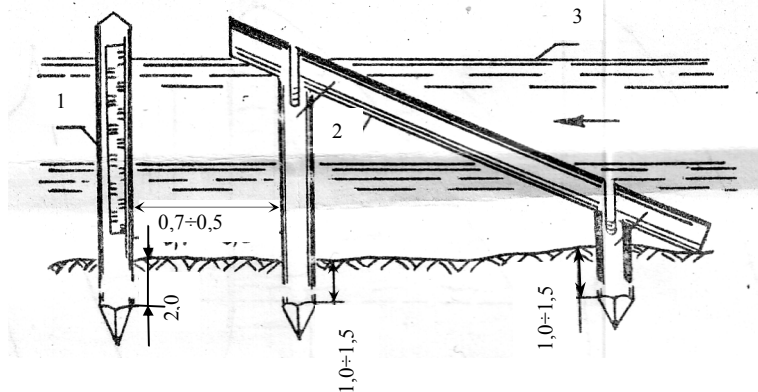


Рис. 15. Речное водомерное устройство: 1 – рейка, укрепленная на свае; 2 – ограждение рейки от плавущих предметов; 3 – уровень высоких вод

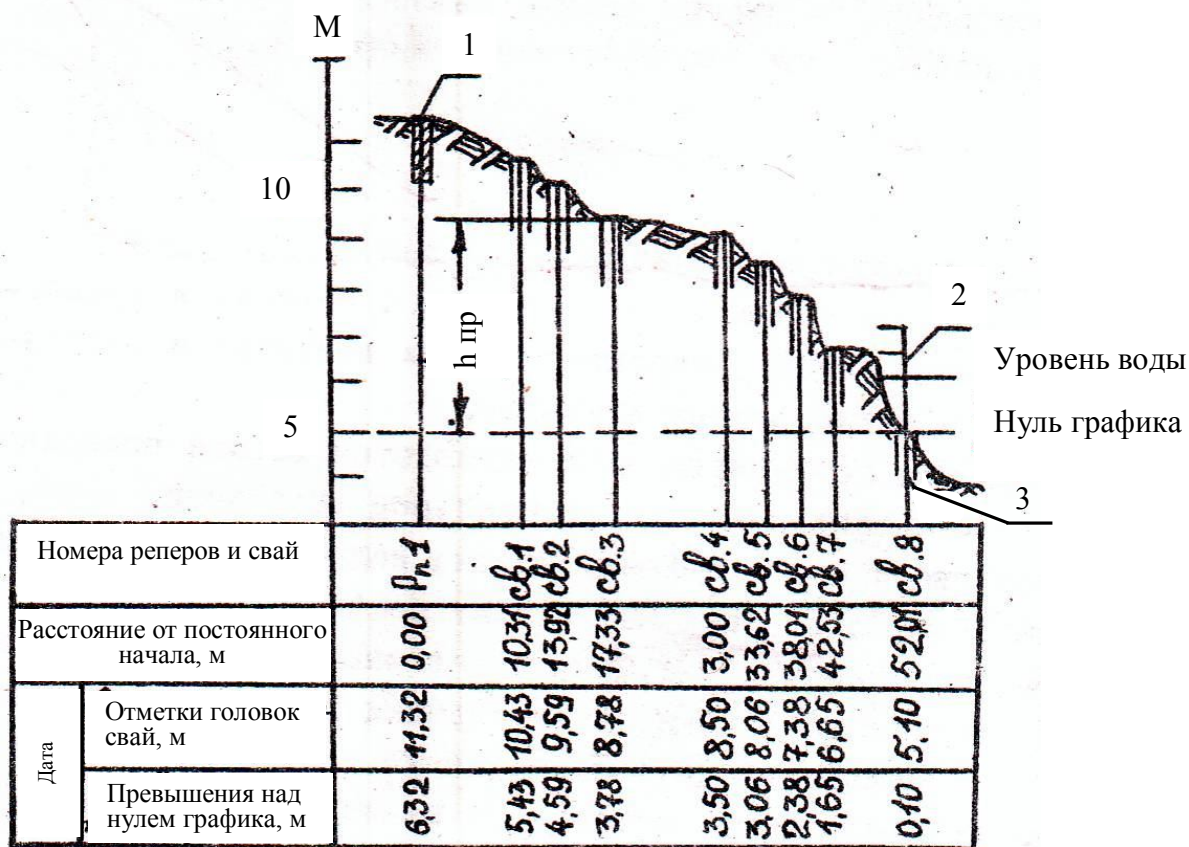


Рис. 16. Свайный водомерный пост: 1 – репер; 2 – рейка; 3 – свая

Разность между отметкой нуля водомерных наблюдений и отметкой нуля графика водомерного поста называется *приводкой* к нулю графика поста.

Пункт, оборудованный устройством и приборами для наблюдений за гидрологическим режимом вод, называется гидрологическим постом или гидрологической станцией. Станция отличается от поста большим объемом наблюдений. В зависимости от объекта изучения эти пункты подразделяются на речные, водохранилищные, озерные и болотные.

Выполнение данной работы преследует цель более глубокого изучения поставленных вопросов, а также решение конкретных заданий по определению всех характеристик стока.

### *Задание*

Определить следующие характеристики стока.

Объем стока  $W_{ст} = ?$

Слой стока  $h_{ст} = ?$

Модуль стока  $q = ?$

Коэффициент стока  $\sigma = ?$

Если  $F$  площадь водосбора,  $m^2 = ?$

Сток,  $mm = ?$

Осадки,  $mm = ?$

$Q$  средний расход воды,  $m^3/c = ?$

$t$  расчетное время, минуты = ?

## **РАБОТА 6. ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ПОЧВОГРУНТАХ. ЗАКОН ДАРСИ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ФИЛЬТРАЦИИ И СПОСОБЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И РАСХОДА ВОДЫ ГРУНТОВОГО ПОТОКА**

### **1. Движение воды в почвогрунтах. Закон Дарси**

В пористой среде, какой является почва, фильтрующаяся вода вследствие вязкости испытывает большое сопротивление. Движение воды может происходить только при наличии определенного уклона, изменяющегося в зависимости от водно-физических свойств почв и прежде всего пористости грунта. Рассмотрим такой опыт. Трубку длиной  $\ell$  (рис. 17) заполним песком, удерживая его от размыва на концах трубки сеткой. Затем заполним водой левое колено. При поступлении фильтрующейся воды из левого в правое колено она образует напор  $h_2$ , меньший напора  $h_1$  в левом колене. Гидравлический уклон  $i$  принимается равным отношению разности напоров  $h_2 - h_1 = H$  к длине пути фильтрации  $\ell$ , поэтому скорость фильтрации определяется по формуле

$$v = K \frac{h_1 - h_2}{\ell} = \frac{\Delta h}{\ell} = K \cdot i.$$

Для многих грунтов (песка, глины, торфяных почв и т. д.), где происходит ламинарное движение воды, скорость фильтрации очень мала и гидравлический уклон равен пьезометрическому. Наблюдается линейная зависимость скорости фильтрации от пьезометрического уклона, см/с:

$$V = K \cdot i,$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом фильтрации. Он равен скорости фильтрации при уклоне, равном единице.

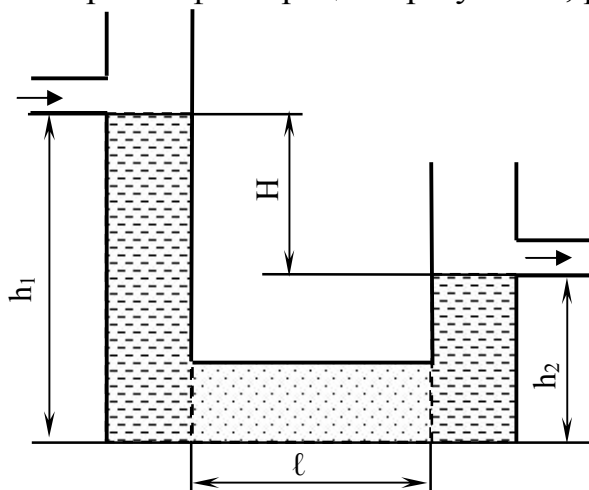


Рис. 17. Схема опыта по проверке закона Дарси

Это равенство было установлено в 1856 г. Анри Фелибером Гаспаром Дарси и называется законом Дарси.

В гидравлике величину  $i$  называют *гидравлическим уклоном*, или *градиентом напора*, определяя ее как отношение потерь напора  $\Delta h = h_1 - h_2$  к пути  $l$ .

*Водоотдачей* называется способность водонасыщенных грунтов отдавать воду путем свободного стекания. Коэффициент водоотдачи  $\mu$  представляет собой отношение объема стекающей из грунта свободной (гравитационной) воды к объему всего грунта, выраженное в долях единицы или в процентах. *Удельная водоотдача* – это количество воды, которое можно получить из 1 м<sup>3</sup> грунта. Наибольшей водоотдачей обладают крупнообломочные породы. Водоотдача глин ничтожна.

*Водопроницаемостью* грунтов называют их способность пропускать через себя воду под действием силы тяжести или градиентов гидростатического давления. Водопроницаемость зависит от размера и формы частиц грунта, от размера и количества пор и трещин в грунте, его гранулометрического состава. Чем больше размер частиц грунта и однороднее его состав, тем больше его водопроницаемость. Если промежутки между крупными частицами грунта заполнены более мелкими частицами, водопроницаемость грунта снижается.

Водопроницаемость грунтов – очень важная характеристика при исследовании движения подземных вод (табл. 1).



Коэффициент фильтрации ( $K_f$ ) характеризует водопроницаемость грунтов. Он зависит от количества и размера пор и от свойств фильтрующейся жидкости. Коэффициент фильтрации, как это следует из формулы Дарси, численно равен скорости фильтрации при гидравлическом уклоне равном 1.

Таблица 1

Классификация грунтов по степени водопроницаемости

Группы грунтов	Тип грунта	Коэффициент фильтрации $K_f$ , м/сут
Высокопроницаемые	Гравий, галька, сильно закарстованные породы	$>100$
Хорошо водопроницаемые	Крупнозернистые пески, сильно трещиноватые породы	10 – 100
Водопроницаемые	Средне- и мелкозернистые пески, умеренно трещиноватые и закарстованные породы	0,1 – 10
	Торф осоковый слаборазложившийся	1,7 – 5,0
	Торф осоковый среднеразложившийся	0,2 – 0,7
	Торф сфагновый слаборазложившийся	0,2 – 6,9
	Торф сфагновый хорошо разложившийся	0,08 – 1,7
Слабоводопроницаемые	Суглинки, супеси, песчанистые глины, слаботрещиноватые породы	$10^{-3} - 10^{-1}$
Весьма слабоводопроницаемые	Тяжелые суглинки, глины	$10^{-6} - 10^{-3}$
Практически водонепроницаемые (водопоры)	Плотные глины, нетрещиноватые скальные породы	$< 10^{-6}$

Коэффициент фильтрации выражают в единицах скорости: м/сут, м/ч, м/с, см/с, мм/мин и т. д. Это – очень важная характеристика, используемая при изучении движения подземных вод. Коэффициент фильтрации отражает водопроницаемые свойства грунта. Ориентировочно значения коэффициента фильтрации для некоторых грунтов приведены в табл. 2. При сравнении коэффициентов фильтрации и пористости грунтов обращает на себя внимание факт резкого уменьшения коэффициентов фильтрации у суглинков и глин, несмотря на их повышенную пористость. Объясняется это тем, что мелкие поры этих грунтов заполнены пленочной и капилляр-

ной водой, препятствующей движению свободной (гравитационной) воды. Коэффициент фильтрации обычно определяют экспериментальным путем.

Важно обратить внимание на то, что глины, несмотря на большую пористость, благодаря очень малым размерам пор обладают ничтожной водоотдачей и соответственно являются в целом водонепроницаемыми. Однако глинистые слои могут, хотя и медленно, все же фильтровать воду. Это необходимо учитывать при оценке питания подземных вод через толщи глины.

*Капиллярность* грунта называют его способность содержать (пропускать) воду. Высота капиллярного поднятия ( $H$ ) зависит от размера капиллярных пор, гранулометрического состава грунта, температуры воды и других характеристик. Чем мельче крупность частиц грунта и мельче поры, тем больше высота капиллярного поднятия. Понижение температуры и увеличение минерализации воды ведут к увеличению вязкости воды и увеличению сил поверхностного натяжения, что повышает высоту капиллярного поднятия.

Высота капиллярного поднятия воды над уровнем грунтовых вод обратно пропорциональна диаметру капиллярных каналов и крупности частиц грунта. При диаметре зерен грунта более 2 – 2,5 см капиллярного поднятия не происходит. Высота капиллярного поднятия  $H$  в некоторых грунтах приведена в табл. 2.

Таблица 2

Высота поднятия воды по капиллярам

Грунт	$H$ , см
Песок крупнозернистый	2,0 – 3,5
Песок среднезернистый	3,5 – 12,0
Песок мелкозернистый	35 – 120
Супесь	120 – 350
Суглинки	350 – 650
Глины	650 – 1200

В порах крупнозернистых грунтов (гравий, галька, щебень и др.) скорость фильтрации может быть очень большой и не зависит от пористости, в таком случае движение воды не подчиняется закону Дарси, что является верхней границей применения уравнения Дарси.

К грунтовой следует относить гравитационную воду, движение которой в почве подчиняется закону Дарси независимо от глубины залегания в почве или грунте.

## 2. Определение коэффициентов фильтрации

### *Определение коэффициента фильтрации методом восстановления воды в скважине после откачки*

При этом методе для каждой почвенной разности тарелочным буром диаметром 10 – 20 см устраивают две скважины глубиной, равной глубине

осушительных каналов или дрен. После того, как скважина сделана, следует выждать, пока уровень воды в скважине займет первоначальное положение, т.е. до тех пор, пока подъем воды в скважине прекратится. После этого измеряют следующие величины: глубину стояния грунтовой воды от поверхности; начальный уровень  $h$ ; глубину скважины  $T$ ; глубину воды в скважине  $H$ ; диаметр скважины  $d$  (рис. 18).

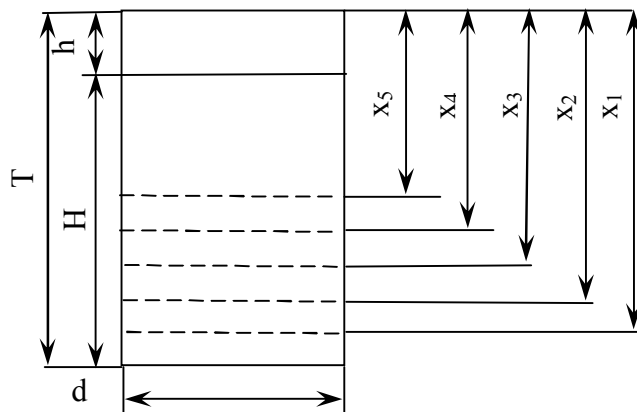


Рис. 18. Измерение подъема воды в скважине после откачки

Все эти величины измеряют с помощью рейки, разделенной на сантиметры. Измерения от поверхности почвы производят от нижнего края доски длиной около 0,5 м, которую укладывают на поверхность почвы поперек скважины, несколько перекрывая ее.

Когда измерения сделаны, воду из скважины вычерпывают, оставляя на дне лишь небольшой (5 – 10 см) слой воды. Вычерпывание удобно производить консервной банкой емкостью 0,5 л, которая прибивается на длинную деревянную ручку. После вычерпывания воды быстро измеряют расстояние  $X_1$  (от поверхности почвы до пониженного уровня воды в скважине) и отмечают время измерения.

При дальнейшем подъеме воды эти измерения периодически повторяют, при каждом измерении величины  $X_2$  отмечают время. Измерения ведут до тех пор, пока уровень воды в скважине поднимается до первоначального положения (до откачки). Таких измерений делают до 8 и более. Время, через которое проводят измерения, зависит от скорости подъема воды в скважине. При быстром подъеме воды измерения проводят через меньшие промежутки времени.

Когда уровень воды в скважине займет свое первоначальное положение, производят вторую откачку воды и повторяют измерения.

Данные измерений и обработку результатов выполняют по определенным формам (бланкам).

#### *Пример*

Определить коэффициент фильтрации  $K$  способом восстановления воды в скважине после откачки.

Дано:

Глубина скважины  $T = 57$  см.

Глубина стояния грунтовой воды  $h_1=22$ ,  $h_2=22$  см.

Глубина воды в скважине  $H$  при 1-й откачке – 43 см, при 2-й откачке – 45 см.

Диаметр скважины  $d = 16$  см.

Записи подъема уровня воды в скважине сводятся в табл. 3.

Таблица 3

Форма записей подъема уровня воды при определении  $K$

Номер наблюдений	Первая откачка			Вторая откачка		
	расстояние от поверхности почвы до поднимающегося уровня воды ( $x_1$ )	время		расстояние от поверхности почвы до поднимающегося уровня воды ( $x_1$ )	время	
		часы	минуты		часы	минуты
1	62	13	34	61	15	00
2	58	13	36	57	15	04
3	54	13	39	53	15	08
4	48	13	42	47	15	14
5	42	13	48	41	15	21
6	38	13	56	36	15	32
7	35	14	03	–	–	–

Порядок заполнения таблицы следующий:

-в графы 2 и 5 записывают число секунд, получающихся путем вычитания из времени проведения данного наблюдения времени первого наблюдения;

-в графы 3 и 6 записывают разности, получаемые от вычитания из наблюдаемых величин  $X_2$  глубины стояния грунтовой воды от поверхности  $h$ . Первая из этих разностей, относящаяся к нулю секунд, является величиной  $X_0$ ;

-для заполнения граф 4 и 7 величину  $X_0$  делят последовательно на каждое из полученных значений  $X$  и определяют по таблицам логарифмов логарифмы частных ( $\lg X_0 - \lg X$ ).

Обработку результатов измерений представляют в виде таблицы (табл. 4).

Дальнейшая обработка материалов может производиться аналитическим или графическим способом.

При аналитическом способе каждое значение логарифма делят на соответствующее значение секунд и получают условные тангенсы угла наклона  $\text{tg} \alpha$ . Затем определяют средние значения  $\text{tg} \alpha$  для 1-й и для 2-й откачки.

Форма обработки результатов наблюдений при определении К

Номер наблюдений	Первая откачка			Вторая откачка		
	число секунд	$x = x_1' - h$	$\lg \frac{x_0}{x}$	число секунд	$x = x_1' - h$	$\lg \frac{x_0}{x}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0	40	0	0	39	0
2	120	36	0,0458	240	35	0,0470
3	300	32	0,0970	480	31	0,0997
4	480	26	0,1871	840	25	0,1932
5	840	20	0,3011	1260	19	0,3123
6	1320	16	0,3980	1920	14	0,4450
7	1740	13	0,4882	–	–	–

При графическом способе на миллиметровой бумаге строят график, на котором в принятом масштабе на оси ординат откладывают значения логарифмов, а на оси абсцисс – соответствующее число секунд. На один график можно нанести точки для 1-й и 2-й откачек, но в разных условных обозначениях (например, кружки и крестики, как показано на рис. 19).

Из нулевой точки (начало координат для 1-й и 2-й откачек) проводят прямые, наиболее точно отвечающие расположению точек данной откачки (путем интерполяции).

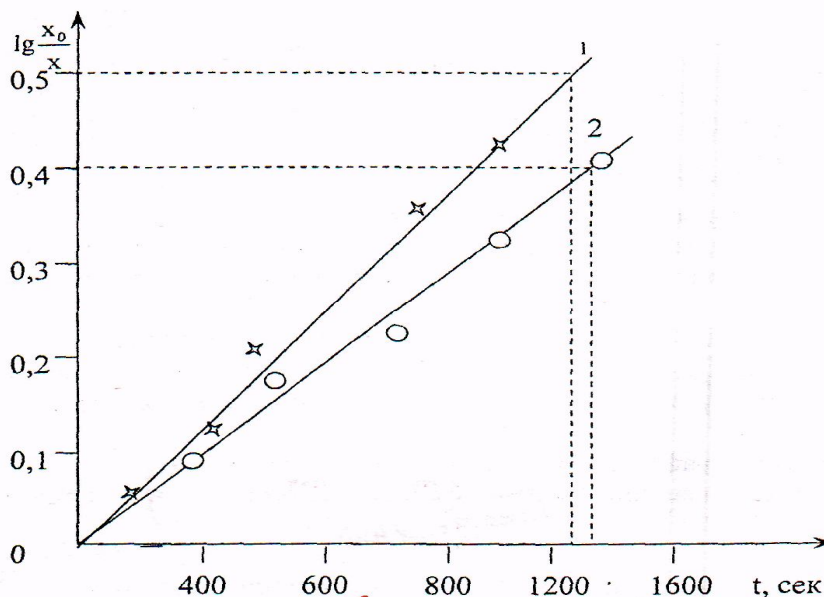


Рис. 19. График определения тангенсов

Для каждой из проведенных прямых определяют условные значения  $\text{tg}$  путем деления любой ее координаты (в логарифмах) на соответствующую абсциссу (в секундах).

В приведенном примере  $\text{tg}\alpha_1 = 0,00029$  и  $\text{tg}\alpha_2 = 0,00024$ .

*Определение коэффициентов фильтрации методом инфильтрации  
воды из скважин и шурфов*

При этом методе на выбранном месте устраивают измерительный шурф сечением не менее 0,2 x 0,2 м или скважину диаметром не менее 0,2 м. Дно шурфа и скважины должно доходить до поверхности того слоя, водопроницаемость которого определяется. При глубоком залегании изучаемого слоя (глубже 0,5 – 0,6 м) сначала выкапывают обычный почвенный шурф (яму), а на дне его устраивают измерительный шурф или скважину. В неустойчивых грунтах шурфы или скважины закрепляют. На дно шурфа или скважины забивают колышек, возвышающийся над дном на 5 – 10 см. На дно насыпают мелкий гравий или песок толщиной около 2 см.

После этого в шурф или скважину наливают воду до верха колышка. Затем доливают определенное количество воды (0 – 1000 см<sup>3</sup>) и отмечают время долива по часам. Когда уровень воды в скважине снизится до верха колышка, снова доливают то же количество воды и замечают время и т. д.

В бланке специальной формы записывают время долива и объем вылитой воды (табл. 5).

Таблица 5

Вычисление расходов воды для определения коэффициента фильтрации

Дата определения	Номера доливов	Время начала определений (наполнения водой до верха колышка)	Время долива воды	Количество долитой воды, см <sup>3</sup>	Время между доливами, с	Фильтрационный расход, см <sup>3</sup> /с
15.06. 2008 г.	0	9 ч 00 мин				
	1		9 ч 12 мин	500	720	0,69
	2		9 ч 30 мин	500	1080	0,45
	3		9 ч 52 мин	500	1320	0,38
	4		10 ч 22 мин	500	1800	0,28
	5		10 ч 59 мин	500	2220	0,23
	6		11 ч 41 мин	500	2520	0,20
	7		12 ч 20 мин	500	2500	0,20

Так как сначала одновременно с фильтрацией происходит и впитывание воды в почву (образование пленочной и капиллярной воды), то поступление воды в почву с течением времени замедляется. Исследования продолжают до тех пор, пока фильтрационный расход не стабилизируется.

Коэффициент фильтрации определяют по формуле

$$K = \frac{Q}{F},$$

где  $Q$  – установившийся расход воды, см<sup>3</sup>/с;

$F$  – площадь смоченной поверхности шурфа или скважины, см<sup>2</sup>.

Площадь определяют по следующим формулам:

-для скважин с незакрепленными стенками  $F = \pi r (r+2z)$ ;

-для скважин с закрепленными стенками  $F = \pi r^2$ ;

-для шурфов с незакрепленными стенками  $F = ab+2(a+b)z$ ;

-для шурфов с закрепленными стенками  $F=ab$ ,

где  $r$  – радиус скважины, см;

$a$  и  $b$  – длина сторон прямоугольного шурфа, см;

$z$  – высота постоянного слоя воды, см.

### *Пример*

Определить коэффициент фильтрации по способу инфильтрации (способ Болдырева).

Дано:

Диаметр скважины  $d = 20$  см, поддерживаемый слой воды  $z = 5$  см. Время долива и объем вылитой воды приведены в табл. 5.

$$F = 3,14 \cdot 10 \cdot (10 - 2,5) = 628 \text{ см}^2;$$

$$K = \frac{0,20}{628} = 0,32 \text{ см/с.}$$

### **3. Определение скорости и расхода воды грунтового потока**

Сначала определяют уклон грунтовых вод. Для этого на местности разбивается треугольник, по углам треугольника, близкого к равностороннему, бурят скважины. Стороны треугольника измеряют, а треугольник снимают инструментально (гониометром, теодолитом и пр.). Нивелировкой определяют отметки поверхности земли у каждой скважины. После этого измеряют глубины грунтовых вод в скважинах и вычисляют отметки уровней грунтовой воды; по этим отметкам проводят горизонталы, которые называются гидроизогипсами. По гидроизогипсам определяют уклон грунтовой воды.

Расход грунтового потока  $Q$  определяется по формуле

$$Q = wv.$$

Площадь поперечного сечения грунтового потока определяют умножением мощности потока  $H$  на его ширину  $B$ .

### *Пример*

Определить скорость и расход воды грунтового потока мощностью  $H = 2,3$  м при ширине потока  $B = 500$  м,  $K = 0,012$  см/с = 10,37 м/сутки.

Отметки поверхности земли у трех скважин соответственно равны: 1) 30,75; 2) 26,75 и 3) 28,60. Глубина грунтовой воды (от поверхности почвы) равна: 1) 2,25; 2) 1,75; 3) 1,60 м. Следовательно, отметки уровня грунтовой воды соответственно равны: 1) 28,50; 2) 25,00 и 3) 27,00 м. На рис. 20 показаны эти отметки и проведенные по ним через 0,5 м гидроизогипсы.

Для определения уклона грунтовых вод на плане (см. рис. 20) перпендикулярно гидроизогипам проведена линия АВ, длина которой  $L = 365$  м (длина определяется по плану в принятом масштабе).

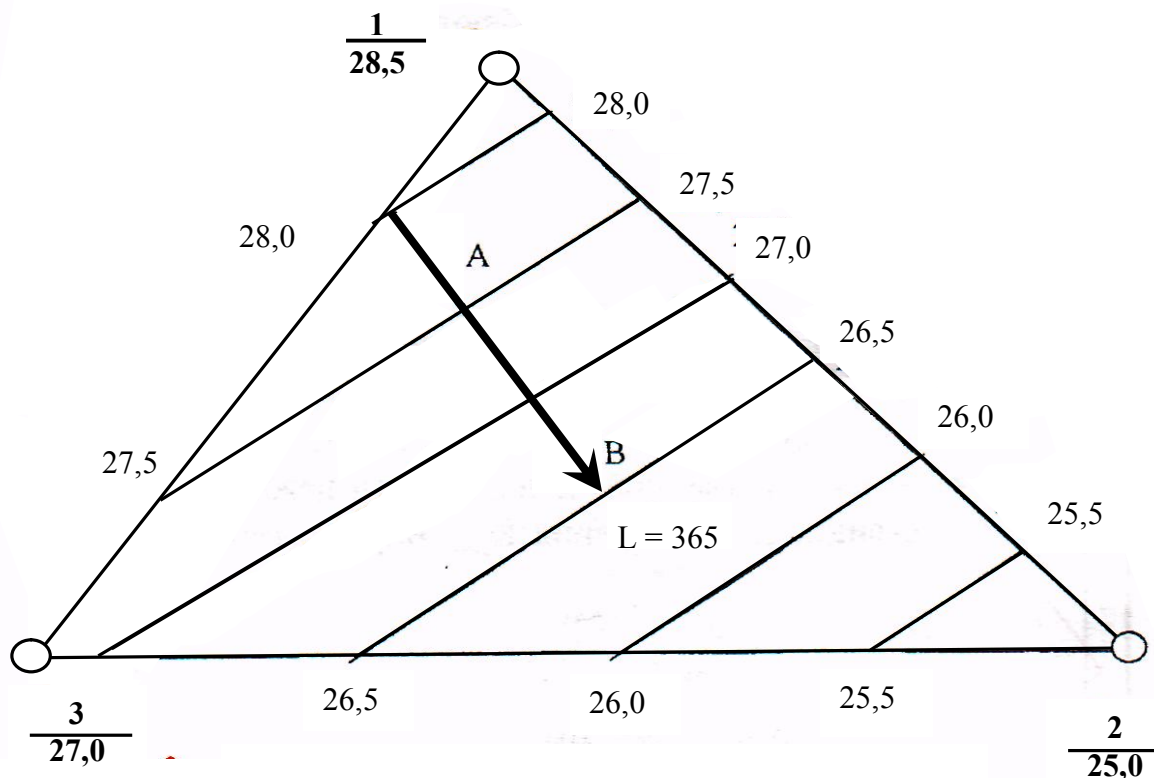


Рис. 20. Расположение скважин и гидроизогипс

Превышение между точками А и В равно разности отметок:

$$h = 28,0 - 26,5 = 1,5 \text{ м, следовательно, уклон } i = \frac{h}{L} = \frac{1,5}{365} = 0,0041.$$

Площадь поперечного сечения потока, скорость и расход воды равны:

$$w = HB = 1150 \text{ м}^2;$$

$$v = K \cdot i = 10,37 \cdot 0,0041 = 0,043 \text{ м/сутки};$$

$$Q = w \cdot v = 1150 \cdot 0,043 = 48,9 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Работа выполняется по индивидуальному заданию.

## РАБОТА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕР

*Озеро* – естественный водоем суши с замедленным водообменом. Как правило, озера обладают выработанными под воздействием ветрового волнения берегами. Для образования озера необходимы два неперенных ус-



ловия – наличие естественной котловины, т.е. замкнутого понижения земной поверхности, и находящегося в этой котловине определенного объема воды.

Многие страны богаты озерами. Так, озерность Финляндии составляет 9,4, Швеции – 8,6 %. Озерность России около 2,1 %. Их больше всего на Кольском полуострове (6,3 % территории), в Карелии и на Северо-Западе Европейской части (5,4 %), на Западно-Сибирской низменности (4,3 %).

Основные характеристики важнейших озер мира приведены в табл. 6. В пресных озерах России сосредоточено 26500 км<sup>3</sup> воды, причем только в восьми крупнейших пресных озерах (Байкал, Ладожское, Онежское, Чудское с Псковским, Таймыр, Ханка, Белое) находится 24250 км<sup>3</sup> воды (91,5 %). На долю Байкала приходится 86,8 % запасов пресных вод в озерах России и более 25 % запасов вод во всех пресных озерах мира. Байкалу по запасу пресной воды уступают все озера Земли, в том числе Танганьика – 21 % и Верхнее – 13 % объема воды в пресных озерах планеты.

### Типы озер

Озера подразделяют по размеру, степени постоянства, географическому положению, происхождению котловины, характеру водообмена, структуре водного баланса, термическому режиму, минерализации вод, условиям питания водных организмов и др.

По **размеру** озера подразделяют на *очень большие* площадью свыше 1000 км<sup>2</sup>, *большие* – площадью от 101 до 1000 км<sup>2</sup>, *средние* – площадью от 10 до 100 км<sup>2</sup> и *малые* – площадью менее 10 км<sup>2</sup>.

По **степени постоянства** озера делят на *постоянные* и *временные* (эфемерные). К последним относятся водоемы, которые заполняются водой лишь во влажные периоды года, а в остальное время пересыхают, а также некоторые термокарстовые озера, теряющие воду в летний период.

По **географическому положению** озера подразделяют на *интразональные*, которые находятся в той же географической (ландшафтной) зоне, что и водосбор озера, и *полизональные*, водосбор которых расположен в нескольких географических зонах. Малые озера на равнинах, как правило, интразональны, крупные озера обычно полизональны. Полизональны также и горные озера, водосбор которых расположен в нескольких высотных ландшафтных зонах.

По **происхождению озерные котловины** могут быть тектонические, вулканические, метеоритные, ледниковые, карстовые, термокарстовые, суффозионные, речные, морские, эоловые, органогенные. Такое же название дают и озерам, находящимся в этих котловинах.

По **характеру водообмена** озера подразделяют на *сточные* и *бессточные*. Первые из них сбрасывают часть поступающего в них речного стока вниз по течению (примером могут служить такие озера, как Байкал, Онежское, Ладожское и др.). Частным случаем сточных озер являются

проточные озера, через которые осуществляется транзитный сток реки; к таким водоемам относятся озера Чудское с Псковским (р. Великая), Сарезское (р. Мургаб), Боденское (р. Рейн), Женевское (р. Рона). Бессточными считают озера, которые, получая сток извне, расходуют его лишь на испарение, инфильтрацию или искусственный водозабор, ничего не отдавая в естественный или искусственный водоток. Иначе говоря, из таких водоемов поверхностный сток отсутствует (примерами могут служить Каспийское и Аральское моря, озера Иссык-Куль, Балхаш, Чад и др.).

Таблица 6

Важнейшие озера мира

Часть света	Озеро	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>	Наибольшая глубина, м
Европа	Каспийское море	392600	78650	1025
	Ладожское	17700	908	230
	Онежское	9630	295	127
	Венерн	5550	180	100
	Чудское с Псковским	3550	25	15
	Белое	1290	5,2	20
Азия	Аральское море	67000	1080	69
		18000	128	47
	<i>Байкал</i>	<i>31400</i>	<i>23000</i>	<i>1636</i>
	Балхаш	18200	112	26
	Тонлесап	10000	40	12
	Иссык-Куль	6200	1730	702
	Таймыр	4560	13	26
	Ханка	4190	18,5	10,6
	Чаны	2500	4,3	10
	Африка	Виктория	69000	2700
Танганьика		32900	18900	1435
Ньяса		30900	7725	706
Чад		16600	44,4	12
Туркана (Рудольф)		6750	203,6	109
Альберт		5300	64	57
Северная Америка	Верхнее	82680	11600	406
	Гурон	59800	3580	229
	Мичиган	58100	4680	281
	Большое Медвежье	30200	1010	137
	Большое Невольничье	27200	1070	156
	Эри	25700	545	64
	Виннипет	24600	127	19
	Онтарио	19000	1710	236
Южная Америка	Маракайбо	13300	–	35
Америка	Титикака	8110	710	230
Австралия	Эйр	9690	30,1	27,7

## Морфология и морфометрия озер

Во всех озерах выделяют основные морфологические элементы: *котловину*, т.е. естественное понижение земной поверхности различного происхождения, в пределах которого и расположено озеро; *ложе* (или *чашу*) озера, непосредственно занятое водой (рис. 21, а).

Важным элементом озерной котловины является *береговая область* (рис. 21, б), которая при абразионном характере берега включает *береговой уступ*, *побережье* и *береговую отмель*. Последние два элемента озерной котловины часто называют *литоралью*, к характерным чертам которой относятся мелководность и воздействие волнения. За пределами литорали находится *подводный откос* (или *сублитораль*). Глубоководная часть озера – это *пелагиаль*; дно озера называют *профундалью*.

Развитие высшей растительности (макрофитов), как правило, ограничено литоралью.

В пределах озера выделяют такие морфологические элементы, как *плесы*, *заливы*, *бухты*.

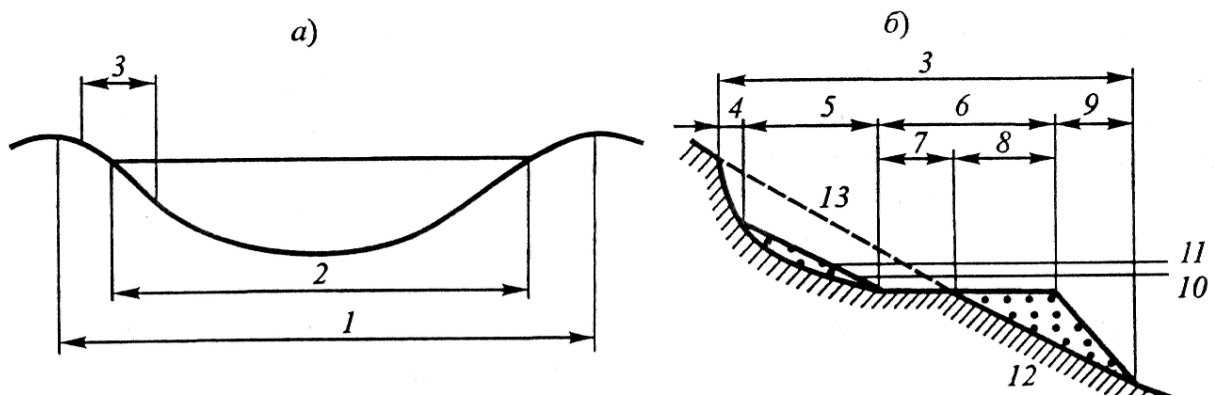


Рис. 21. Схема озерной котловины (а) и ее береговой области (б): 1 – котловина; 2 – ложе (чаша); 3 – береговая область; 4 – береговой уступ; 5 – побережье; 6 – береговая отмель; 7, 8 – абразионная и аккумулятивная части береговой отмели; 9 – подводный откос; 10, 11 – низший и высший уровни воды; 12 – коренные породы; 13 – начальный профиль берега

Основными морфометрическими характеристиками озера служат (рис. 22): *площадь озера*  $F_{оз}$ ; *объем воды в озере*  $V_{оз}$ ; *длина береговой линии*  $L_{бер.л.}$  проведенной по урезу воды; *длина озера*  $L_{оз}$  – кратчайшее расстояние по поверхности воды вдоль оси озера между наиболее удаленными точками береговой линии; *ширина озера*  $B_{оз}$  – расстояние между противоположными берегами озера, измеренное по линии, перпендикулярной оси озера в любой его части. Наибольшее значение последней величины называют *максимальной шириной озера*  $B_{оз.мах}$ . *Среднюю ширину озера* вычисляют по формуле

$$B = F_{оз}/L_{оз}.$$

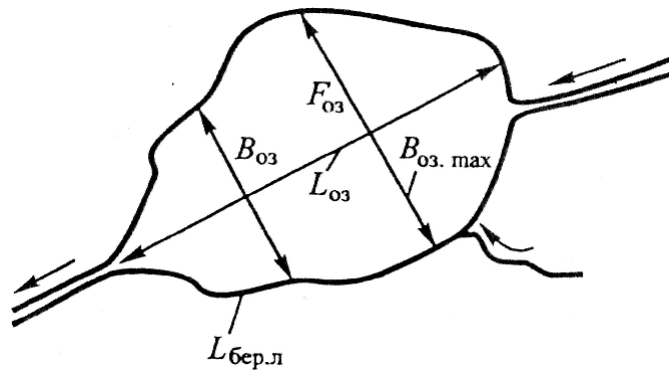


Рис. 22. Морфометрические характеристики озера

Важными морфометрическими характеристиками озера являются его глубина  $h_{оз}$  (в разных частях озера она различна), максимальная глубина  $h_{оз. max}$ , средняя глубина  $h_{оз. ср}$ , которая определяется по формуле

$$h_{оз. ср} = V_{оз} / F_{оз} .$$

Все перечисленные выше морфометрические характеристики озера зависят от высоты стояния уровня воды в нем или от выбранного в толще воды отсчетного горизонта (или глубины). Наиболее важно знать, как изменяются с изменением уровня (или глубины) такие характеристики, как площадь озера, объем воды в нем, средняя и максимальная глубина.

### Водообмен в озерах

Показателем водообмена в озере, или интенсивности водообмена (смены) вод в озере, служит так называемый коэффициент условного водообмена ( $K_в$ ).

Если составляющие водного баланса озера представлены в  $км^3/год$ , то величина  $1/K_в$  численно равна периоду условного водообмена (водообновления), выраженному в годах.

Наиболее общая закономерность, свойственная водообмену озера, следующая: чем меньше объем озера, тем при прочих равных условиях коэффициент водообмена больше. Так, у оз. Ильмень  $K_в = 1,35$ , т.е. обновление вод в озере происходит в среднем за 0,74 года. У небольших проточных озер на Кольском п-ве  $K_в$  достигает 1000 (вода в среднем обновляется за 0,001 часть года, т.е. почти за 9 ч). У крупных водоемов, таких как оз. Байкал и Каспийское море,  $K_в$  составляет 0,0032 и 0,0049, т.е. время условного обновления вод соответственно равно 312 и 204 годам.

По выше приведенной информации каждый студент должен по конкретному заданию (озеру) определить:

1. Тип озера по всем показателям (см. типы озер).
2. Морфологию и морфометрию озера.
3. Описать предположительный водообмен в озере.

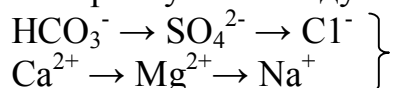
## РАБОТА 8. ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕР

### 1. Гидрохимические характеристики озер

*Классификация озер по минерализации.* В соответствии с общей классификацией природных вод по минерализации озера могут быть подразделены на *пресные* (или пресноводные) с соленостью менее 1 ‰, *солончатые* с соленостью от 1 до 25 ‰, *солёные* с соленостью 25 – 50 ‰ (озера с морской соленостью). Озера последней группы иногда называют *соляными*. Воду в озерах с соленостью более 50 ‰ называют рассолом, а с соленостью воды выше, чем в океане (35 ‰), называют минеральными.

Наименьшую минерализацию имеют озера зоны избыточного и достаточного увлажнения. Так, например, минерализация вод в озерах Байкал, Онежское, Ладожское менее 100 мг/л. В зоне недостаточного увлажнения минерализация озерной воды выше. В Севане соленость воды около 0,7, Балхаше 1,2 – 4,6, Иссык-Куле 5 – 8, в Каспийском море 11 – 13 ‰. Наибольшую минерализацию озера имеют в условиях засушливого климата. Так, соленость воды в озерах Эльтон и Баскунчак составляет 200 – 300 ‰, а в Мертвом море в поверхностном слое соленость воды 262, в придонном – 287 ‰. В Большом Соленом озере в США – 266 ‰, в заливе Кара-Богаз-Гол Каспийского моря – 291 ‰.

*Химический состав озерных вод.* Минерализация воды озер от менее засушливых районов к более засушливым увеличивается. В этом же направлении происходит и трансформация основного химического состава вод (содержания анионов и катионов): воды из гидрокарбонатного класса переходят в сульфатный и хлоридный, а из кальциевой группы – в магниевую и натриевую по следующей схеме:



В воде озер тундры преобладают ионы  $\text{HCO}_3^-$ , в озерах лесной зоны –  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , в озерах степной зоны –  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , в озерах пустыни –  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  (вода таких озер приближается по своему составу к океанической). В некоторых соляных озерах вода представляет собой *рассол*, или *рапу*, содержащую соли в состоянии, близком к насыщению. Если такое насыщение достигнуто, то начинается осаждение солей, и озеро превращается в *самосадочное*.

Помимо растворенных солей вода озер содержит не только биогенные вещества (соединения азота (N), фосфора (P), кремния (Si), железа (Fe) и др.), но и растворенные газы (кислород ( $\text{O}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и др.), органические вещества.

*Биогенные вещества* в озерной воде необходимы для жизнедеятельности водных организмов, однако их избыток приводит к ухудшению качества воды в озерах.

*Кислород* поступает в озера в основном из атмосферы, а также продуцируется в процессе фотосинтеза. При его избытке он уходит из воды в атмосферу. Кислород также расходуется «при дыхании» водных организмов, при разложении и окислении органического вещества, находящегося в озере. Содержание кислорода в водной толще озера – непереносимое условие жизни и развития большинства водных организмов. В процессе их жизнедеятельности кислород потребляется, а диоксид углерода выделяется. Поэтому к концу летнего периода в глубоких местах озера может возникнуть недостаток кислорода и избыток диоксида углерода. Плотностная (температурная) стратификация препятствует в это время вертикальному перемешиванию и обновлению вод. Аналогичная ситуация обычно складывается к концу зимы, когда недостаток кислорода в придонных слоях может даже привести к замору рыбы (озеро «горит»).

Обогащение толщи воды кислородом происходит во время интенсивного вертикального конвективного и динамического перемешивания (обычно в периоды весенней и осенней гомотермии).

*Сероводород* может образоваться в придонных слоях озер при разложении органических веществ в условиях отсутствия кислорода.

Интенсивность и направленность газообмена водоема с атмосферой (главный вид поступления и расходования газов в водоемах) определяются степенью насыщенности воды газами, в свою очередь зависящей от растворимости газа при определенных значениях температуры и давления. Если вода поверхностного слоя озера недонасыщена, например, кислородом, то происходит его поглощение из атмосферы; если вода перенасыщена кислородом, часть его удаляется в атмосферу.

## **2. Гидробиологические характеристики озер**

Как и другие водные объекты, озера населены водными организмами (гидробионтами). По условиям питания водных организмов (трофическим условиям) озера подразделяются на *олиготрофные* (глубокие озера: Байкал, Иссык-Куль, Телецкое и др. с малым количеством питательных веществ и малой продукцией органического вещества); *евтрофные* (озера с большим поступлением питательных веществ, большим содержанием органического вещества, продуцирование которого ведет к пересыщению кислородом в поверхностном слое воды, а разложение – к недостатку кислорода), *дистрофные* (озера, содержащие в воде избыточное количество органического вещества, и продукты его неполного окисления становятся вредными для жизнедеятельности организмов, как, например, в некоторых заболоченных районах); *мезотрофные* (озера со средними трофическими условиями).

Естественная эволюция небольших по размеру озер в условиях холодного и умеренного климата идет по следующей схеме: олиготрофные → мезотрофные → евтрофные → дистрофные озера → болота.

Существенное влияние на эвтрофирование озер оказывает хозяйственная деятельность – сброс загрязненных вод, богатых соединениями фосфора и азота (коммунальные, сельскохозяйственные и промышленные стоки, возвратные воды орошения и т.д.).

Наиболее богаты жизнью прибрежные районы озера (за исключением берегов, подверженных сильному воздействию волнения). Видовой состав бентоса – высших водных растений (макрофитов), моллюсков и др. – изменяется с увеличением глубины вдоль подводного склона. Для озер в условиях умеренного климата довольно типично, например, следующее «тяготение» некоторых видов водной растительности к глубинам: осока растет на берегу и на глубинах, не превышающих 10 – 20 см, тростник растет до глубины около 1 м, камыш – 2, кувшинки – 2,5, рдест – около 3 м (рис. 23). По мере накопления донных отложений и повышения дна озера водная растительность «движется» к середине озера, и в дальнейшем оно зарастает, превращаясь в болото.

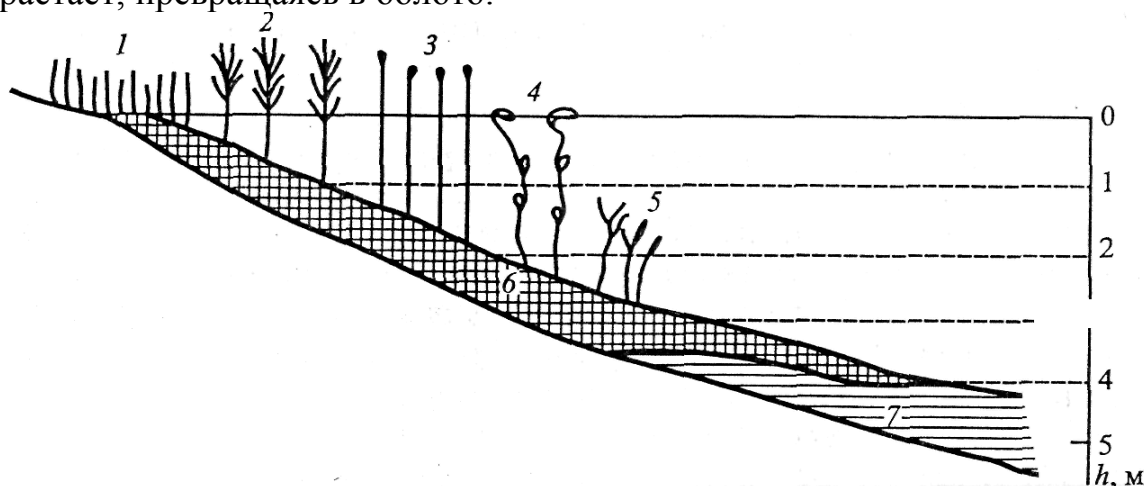


Рис. 23. Схема размещения растительности в прибрежной части озера и зарастания озера: 1 – осока; 2 – тростник; 3 – камыш; 4 – кувшинки; 5 – рдест; 6 – торф; 7 – сапропель

Для озер в условиях умеренного климата характерны такие внутригодовые изменения гидробиологических процессов. В весенний период повышение температуры воздуха и воды приводит к началу вегетации макрофитов, а в водной толще – к развитию фитопланктона (первому «цветению» воды). Во второй половине лета при максимальной температуре воды наступает новый период бурного развития фитопланктона и второе «цветение» воды. Вслед за развитием фитопланктона происходит и увеличение количества зоопланктона. В летнее время активно развивается и бентос. Осенью с понижением температуры воздуха и воды начинают отмирать макрофиты, и сокращается биомасса озера. Испытывают сезонный цикл жизнедеятельности и рыбы, у которых нерест происходит обычно весной и летом, а зимой они впадают в так называемое холодное оцепенение.

### 3. Наносы и донные отложения в озерах

По аналогии с любым водным объектом баланс взвешенных наносов в озерах складывается из следующих основных составляющих: *приходная часть* – поступление наносов с речным стоком вследствие разрушения берегов, эолового приноса продуктов отмирания живых организмов; *расходная часть* – унос с речным стоком и аккумуляция на дне.

Аккумуляция наносов на дне ведет к формированию *донных отложений*, которые по происхождению слагающих их частиц подразделяются на *терригенные* (в основном минеральные частицы, поступающие с водосбора и берегов озера), *биогенные* и *хемогенные* (являющиеся в основном результатом гидробиологических и гидрохимических процессов в водной толще озера).

По составу донные отложения подразделяют на *минеральные* (песок, минеральный ил, соли), *сапропели* (биогенные илы) и *торфянистые*. Сапропели образуются в малых и средних евтрофных озерах лесной зоны. Мощность сапропеля может достигать 30 – 40 м.

В распределении донных отложений по пространству озера отмечается зональность. На литорали, особенно подверженной воздействию волнения, отлагаются наиболее крупные частицы, в основном минеральные. По направлению к наиболее глубоким частям озера крупность частиц донных отложений уменьшается, а в их составе все большую долю приобретают органические илы. Доля биогенных частиц в отложениях обычно увеличивается с уменьшением размеров озер.

Цель работы заключается в описании и осмыслении роли озер в гидросфере и особенно процессов их зарастания и заболачивания. Этот процесс приводит к исчезновению водных объектов и нуждается в поиске мер по его предотвращению.



Уральский государственный лесотехнический университет  
Кафедра лесных культур и мелиораций

Фамилия студента \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Задание № \_\_\_\_

Вычислить расход воды в реке по поверхностной скорости, определенной поплавками и живому сечению при следующих условиях:

1. Расстояние между крайними створами \_\_\_\_\_ м.
2. Время прохождения брошенных в воду поплавков \_\_\_\_\_ с.
3. Промеры живых сечений:

Верхнего створа

Расстояние от уреза воды в м											
Глубина воды в м											

Среднего створа

Расстояние от уреза воды в м											
Глубина воды в м											

Нижнего створа

Расстояние от уреза воды в м											
Глубина воды в м											

Уральский государственный лесотехнический университет  
Кафедра лесных культур и мелиораций

Фамилия студента \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Задание № \_\_\_\_

Определить расходы воды ( $Q$ ) через водосливы при следующих значениях:

– для прямоугольного незатопленного с тонкой стенкой

Если  $b =$

$H =$

– для трапецеидального незатопленного с тонкой стенкой

Если  $b =$

$H =$

– с широким порогом

Если  $b =$

$H =$

– для треугольного незатопленного

Если  $H =$

Образец оформления лабораторной работы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Кафедра лесных культур и мелиораций

## УЧЕНИЕ О ГИДРОСФЕРЕ

Лабораторно-практическая работа № 1

Основные формы рельефа местности и их изображение  
на планах и картах. Звенья древней гидрографической сети

Замечания:

- 1.
- 2.
- 3.

Выполнил (сдал):

Иванов И.И., ЛХФ-14

Дата:

Проверил (принял):

Дата:

Екатеринбург

2009

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Работа 1. Основные формы рельефа местности и их изображение на планах и картах. Звенья древней гидрографической сети .....	4
Работа 2. Гидрология рек .....	6
Работа 3. Гидравлика и ее элементы .....	14
Работа 4. Определение расхода воды по поверхностной скорости, определенной поплавками. Определение расхода воды водосливами .....	21
Работа 5. Круговорот воды в природе и водный баланс. Сток, его характеристики и методы изучения. Гидрологические посты на реках .....	25
Работа 6. Движение воды в почвогрунтах. Закон Дарси. Коэффициенты фильтрации и способы их определения. Определение скорости и расхода воды грунтового потока .....	31
Работа 7. Определение основных морфометрических характеристик озер .....	40
Работа 8. Гидрохимическая и гидробиологическая характеристики озер .....	45
Приложения .....	49
Рекомендуемая литература .....	51

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бабилов, Б.В. Гидротехнические мелиорации лесных земель [Текст] / Б.В. Бабилов. – М.: Экология, 1993. 224 с.
2. Вендров, С.Л. Жизнь наших рек [Текст] / С.Л. Вендров. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. 192 с.
3. Лосев, К.С. Вода [Текст] / К.С. Лосев. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. 270 с.
4. Михайлов, В.Н. Гидрология [Текст] / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2005. 403 с.
5. Чиндяев, А.С. Гидротехнические мелиорации лесных земель [Текст]: метод. разработки по выполнению лабораторно-практических занятий для студентов лесохозяйственного факультета (спец. 3112) / А.С. Чиндяев. – Свердловск, 1990. 25 с.
6. Чиндяев, А.С. Гидротехнические мелиорации лесных земель. Основы гидрологии, гидравлики, гидрометрии [Текст]: метод. указания для студентов специальности 3112 / А.С. Чиндяев. – Екатеринбург, 1992. 22 с.
7. Чиндяев, А.С. Водные ресурсы Земли. Их формирование и использование [Текст]: учеб. пособие / А.С. Чиндяев. – Екатеринбург: УГЛТА, 1999. 157 с.
8. Эдельштейн, К.К. Гидрология материков [Текст]: учеб. пособие для студ. вузов / К.К. Эдельштейн. – М.: Академия, 2005. 304 с.