



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ГИДРОЛОГИЯ

ФРОЛОВА Н. Л.
ДОБРОЛЮБОВ С. А.

ГЕОФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция 1. Введение в гидрологию	7
Введение	7
Роль воды в природе и в обществе. Практическое значение гидрологии.....	10
Водные угрозы	11
Гидрология, ее предмет и задачи. Связь с другими науками.....	13
Основные этапы истории гидрологии	15
Водные объекты и их типы. Понятие о гидросфере	18
Гидрологические характеристики и гидрологическое состояние водного объекта. Гидрологический режим и процессы.....	20
Лекция 2. Вода как вещество. Молекулярная структура. Изотопный состав. Свойства поверхностных вод.....	22
Введение	22
Вода: химические и физические свойства	22
Строение молекулы воды	22
Водородные связи.....	23
Структурные модели воды и льда.....	23
Изотопный состав воды	24
Виды воды	25
Свойства тяжелой воды	25
Изотопия природных вод.....	25
Природные воды, их классификация.....	26
Характеристики содержания в воде растворенных веществ.....	27
Классификация природных вод	27
Состав вод	28
Водные объекты и их гидрохимические особенности.....	29
Качество воды	31
Агрегатные состояния воды. Фазовые переходы.....	31
Плотность воды и ее зависимость от различных параметров.....	33
Тепловые свойства воды	37
Физические аномалии воды и их гидрологическое значение	38
Лекция 3. Физические основы процессов в гидросфере.....	42
Физические основы процессов в гидросфере.	42
Уравнение баланса вещества для водного объекта.....	42
Уравнение теплового баланса для водного объекта	44
Уравнение движения водного потока.....	45
Классификация видов движения в водных объектах по изменчивости.....	46

Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы движения воды. Число Рейнольдса.....	47
Типизация рек по состоянию водной поверхности. Число Фруда	48
Лекция 4. Важнейшие процессы в гидросфере.....	49
Современные исследования для определения запасов влаги в объектах. Спутники Grace.....	49
Глобальные процессы перераспределения теплоты	50
Круговорот воды.....	52
Схема внутриматерикового влагооборота	54
Интенсивность внешнего водообмена.....	55
Лекция 5. Водные ресурсы и их использование.....	57
Период обновления воды.....	57
Круговорот солей и минеральных частиц, круговорот газов.....	57
Вода и ее значение для планеты, основные понятия водной экологии.....	59
Классификация водных объектов по условиям питания гидробионтов	62
Водные ресурсы и их использование, классификация ресурсов пресных вод.....	63
Климатические изменения.....	64
Типизация видов использования водных ресурсов.....	65
Структура водопотребления.....	65
Пути уменьшения дефицита воды	67
Гидрология ледников	68
Лекция 6. Гидрология ледников	70
Формы существования твердой воды.....	70
Ледники	71
Классификация ледников.....	71
Изменение площади оледенения.....	75
Источники питания ледников.....	76
Уравнение баланса массы ледника	77
Процессы кристаллизации и трансформации снега	79
Эволюция ледников, режим и движение.....	79
Гидрология подземных вод	82
Физические свойства грунтов	83
Лекция 7. Гидрология подземных вод	87
Подземная гидросфера	87
Характеристика почвенных вод	90
Движение подземных вод	93
Закон фильтрации Дарси	93

Взаимодействие поверхностных и подземных вод	95
Реки и их типы	98
Лекция 8. Гидрология рек	101
Водные объекты в системе межгосударственных отношений.....	101
Река Нил	103
Нормативно-правовые условия решения трансграничных водных проблем.....	105
Водосбор и бассейн реки	105
Морфометрические характеристики.....	107
Лекция 9. Водный баланс бассейна реки.....	110
Исток и устье реки.....	110
Питание рек.....	110
Классификация рек по сочетанию видов питания	115
Водный баланс бассейна реки	117
Фазы водного режима рек.....	123
Классификация рек по водному режиму.....	124
Лекция 10. Гидрологические характеристики стоков.....	126
Расход воды.....	126
Распределение стока воды по территории СНГ	126
Лекция 11. Движение воды в реках	128
Распределение скоростей течения в речном потоке	128
Определение расхода и скорости течения воды.....	132
Расчетные методы определения скорости течения. Формула Шези	135
Динамика речного потока. Формула Шези-Маннинга	136
Лекция 12. Динамика речного потока	138
Динамика речного потока. Формула Шези-Маннинга (продолжение).....	138
Характеристики речных наносов	139
Мутность	142
Сток речных наносов.....	145
Сели.....	148
Лекция 13. Русловые процессы и их типы	150
Русловые процессы. Русловые деформации	150
Меандрирование речного русла	153
Изменение потоков теплоты и внутренней энергии водного объекта	157
Причины изменения теплового состояния рек	158
Лекция 14. Гидрохимический режим рек.....	160

Минерализация речных вод.....	160
Гидрохимический режим рек	164
Качество воды	167
Классификация гидробионтов.....	167
Лекция 15. Устья рек и особенности их гидрологического режима	170
Устьевая область реки.....	170
Дельта реки.....	171
Устьевые процессы.....	174
Приливы в устьях рек.....	175
Лекция 16. Гидрология озер.....	177
Озеро	177
Классификация озер	178
Морфология и морфометрические характеристики озер	184
Водный баланс озер.....	186
Колебания уровня воды в озерах	188
Термический режим озер. Ледовые явления на озерах	191
Гидрохимические характеристики озер. Классификация озер по минеральному и солевому составу	195
Лекция 17. Гидрология водохранилищ	199
Назначение и типы водохранилищ. Основные характеристики водохранилищ.....	199
Водный режим водохранилищ. Влияние водохранилищ на окружающую среду	201
Водохранилища ГЭС.....	205
Лекция 18. Гидрология морей и океанов.....	208
Мировой океан и его части	208
Рельеф дна Мирового океана	211
Соленость воды и методы ее определения.....	213
Распределение солености в Мировом океане	215
Распределение температуры воды в Мировом океане.....	217
Плотность морской воды. Распределение плотности воды в Мировом океане	220
Ветровое волнение в океанах и морях. Волны	222
Лекция 19. Динамика океанов.....	230
Приливы в океанах и морях.....	230
Морские течения и их классификация	233
Водные массы океанов	236
Ресурсы Мирового океана, их использование и охрана	238

Лекция 1. Введение в гидрологию

Введение

Наиболее острые проблемы, окружающие нас, это проблемы, связанные с водной стихией. Даже рассматривая примеры только последних лет, мы столкнемся с весьма катастрофическими событиями, которые приводят к большому ущербу, человеческим жертвам. Знание гидрологических основ, гидрологических явлений и режимов чрезвычайно важно в современном мире, – в связи с наблюдающимися климатическими изменениями, число опасных процессов только увеличивается.

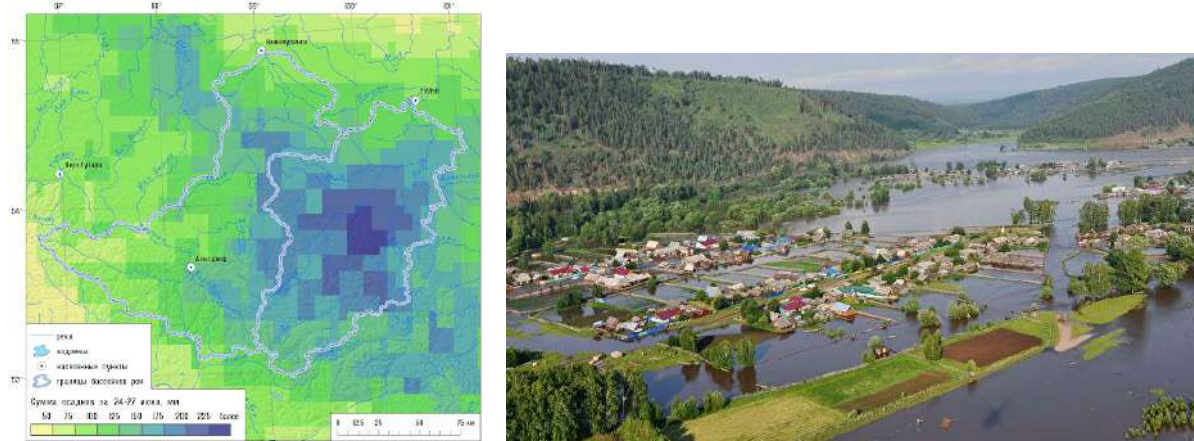


Рис. 1.1. Катастрофический наводок на реках Ия и Уда в Иркутской области 24-27 июня 2019 г.

Рассматривая рис. 1.2, стоит заметить, что в бассейне Амура часто встречаются подобные стихийные бедствия – так, в 2013 г. произошло одно из самых крупнейших наводнений за последнее десятилетие, когда существенная часть бассейна в пойменной территории Амура была затоплена (что также привело к существенному ущербу).

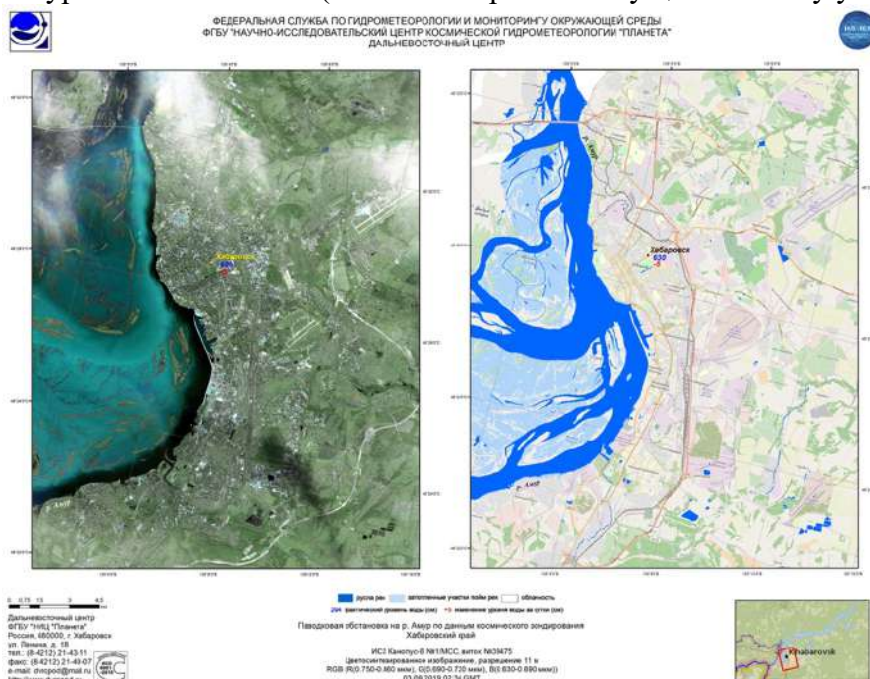


Рис. 1.2. Катастрофический наводок на реках бассейна Амура в августе 2019 г.



Рис. 1.3. Аномально низкая межень на реке Лена.

Одновременно с такими наводнениями во многих регионах России и земного шара в целом встречается обратная ситуация, когда на реках наступают маловодные периоды. В 2019г. подобный период наблюдался на реке Лена (рис. 1.3), когда низкие уровни воды привели к срыву северного завоза, трудностям в водоснабжении многих крупных городов (например, Якутска), а следовательно, и большому ущербу. Причиной послужили погодные аномалии, отсутствие осадков в верховьях бассейнов. Так, желтая линия на графике уровня воды в реке Лена (рис. 1.3) показывает текущих ход уровня воды, а серая полоска (в центре) характерные для этого населенного пункта значения.

Кроме того, в 2019 г. наблюдалось маловодье на Волге, когда просматривался достаточно низкий приток воды в водохранилище Волжско-Камского каскада (~70% от среднееголетних значений). Это привело к угрозе срывов ряда мероприятий, обеспечения водой многих населенных пунктов.

На курсе мы будем обсуждать, что происходит сейчас в природе, с реками. Одна из часто возникающих проблем – низкие весенние половодья, они связаны с отсутствием или крайне малым запасом снежных покровов. За счет снеготаяния, весеннего половодья осуществляется приток к водохранилищам, они накапливают воду и используют в течение года. Ситуация с наводнениями прослеживаются во всем мире (наводнения в Индонезии, Турции, Китае).

Одновременно наблюдается обратная ситуация: маловодье на Дону и в Крыму (рис. 1.6). В целом, подобных тревожных данных (как в Крыму) нет больше нигде – водопотери на пути к потребителю доходят до 80%. Средний уровень этого показателя в российских регионах составляет 20-30%.



Рис. 1.4. Маловодье на Дону и в Крыму.

Принимая во внимание рассматриваемые проблемы, связанные с водой, определим задачи учебного курса:

- Формирование представлений о наиболее общих закономерностях процессов в гидросфере;
- Характеристика особенностей географического распределения водных объектов;
- Информация об основных методах изучения водных объектов и гидрологических процессов;
- Анализ влияния водных объектов на население, хозяйство, экосистемы.

Структура лекционного курса:

1. Свойства природных вод;
2. Механизмы гидрологических процессов;
3. Круговорот воды;
4. Гидрология ледников;
5. Гидрология подземных вод;
6. Гидрология рек;
7. Гидрология озер;
8. Гидрология болот;
9. Гидрология океанов и морей.

Учебные материалы:

- Гидрология (2017), В. Н. Михайлов, С. А. Добролюбов;
- Конспект лекций;
- [Сайт кафедры.](#)

[Email](#) преподавателя.

Роль воды в природе и в обществе. Практическое значение гидрологии

Вода – одно из самых распространенных на Земле химических соединений. Она образует гидросферу, входит в состав литосферы, атмосферы и биосферы. Вода формирует неповторимый облик Земли, используется живыми организмами; в хозяйственной и прочей деятельности. Куда мы бы ни посмотрели, роль воды будет связана с ее уникальностью.

«Вода стоит особняком в истории нашей планеты. Нет природного тела, которое могло бы с ней сравниться по влиянию на ход основных, самых грандиозных, геологических процессов. Нет земного вещества – минерала, горной породы, живого тела, которое бы ее не заключало ...», – В. И. Вернадский».

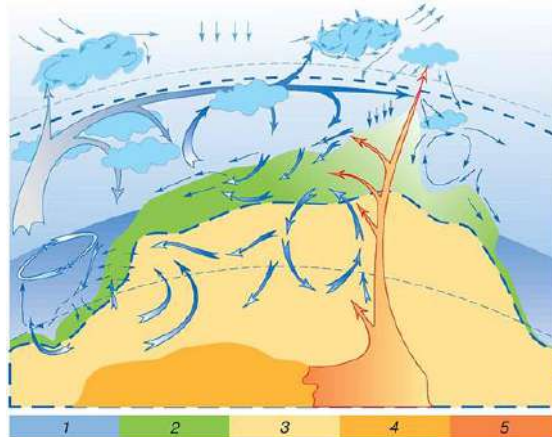


Рис. 1.5. Принципиальная схема единства вод земли (по Л. С. Абрамову): 1 – свободные воды океана, 2 – чехол осадочных пород, 3 – кристаллические породы земной коры, 4 – магматический очаг, 5 – породы мантии.

Без воды невозможно существование биосферы. Она формирует географическую оболочку и облик поверхности Земли. Гидросферу считают прерывистой оболочкой, но если рассматривать все природные воды, то можно говорить о том, что гидросфера включает слоев/поверхностей в атмосфере, почве, подземных водах, глубинных подземных горизонтов, и, связываясь с потоками вещества и энергии, образует сложную систему водоворотов. Так, вся земная твердь в разной степени пронизана водой и имеет общий характер, – поэтому мы говорим об единстве природных вод, и о гидросфере как об оболочке, повсеместно находящейся на поверхности Земли и толще почвогрунтов.

Уникальность воды также заключается в том, что большинство веществ в той или иной степени растворимы в ней.

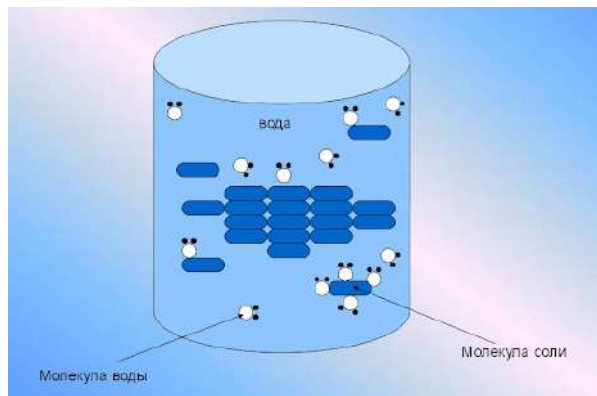


Рис. 1.6. Вода-растворитель.



Рис. 1.10. г. Тьрныауз, 2000 г.

Следующая важная водная угроза – русловые процессы. Русловедение, как и многие другие направления, находится на стыке разных наук, – оно изучает размыв (или, наоборот, заиление), разрушение строения дорог и гидротехнических сооружений.



Рис. 1.11. Русловые процессы (размыв берега, заиление русла).

Угроза, больше свойственная участкам на морских побережьях, – абразия (воздействие волн на берега).



Рис. 1.12. Абразия.

Явление, характерное для северных регионов и рек, текущих на север, – заторы льда. Процесс происходит из-за того, что волна половодья, продвигающаяся на север, встречает еще не разрушенный лед и не может его взломать. Так, волна застревает и образует ледяные перемычки.



Рис. 1.13. Заторы льда.

Подъем уровня воды за счет заторов льда может достигать 28 м.

Гидрология, ее предмет и задачи. Связь с другими науками

Гидрология – одна из фундаментальных дисциплин (сравниться с ней, пожалуй, может только метеорология), основанная на знании многих естественных наук, использовании физических законов, математических методов. Фундаментальность науки позволяет применять самые современные методы методологии, методы моделирования (физического, математического и т. д.). Обилие методов, которыми владеют гидрологи, позволяет гидрологии занимать ведущее место среди прочих дисциплин географии.

Гидрология (греч. Υδρολογία, от др.-греч. ὕδωρ — вода + λογος — слово, учение) – наука о водных объектах и гидрологических процессах, которые в них протекают.

Объект науки – водные объекты планеты и гидрологические процессы.

Предмет науки – закономерности распределения водных объектов и гидрологических процессов.

Задачи науки:

- Изучение закономерностей распределения водных объектов;
- Выявление механизмов гидрологических процессов;
- Анализ их специфики в различных природных условиях;
- Создание и использование методов расчета и прогноза гидрологических процессов;
- Обоснование проектов безопасного водопользования.

На чем основаны знания гидрологических явлений и процессов:



Рис. 1.14. Гидрология и смежные науки.

Если рассматривать, из чего состоит сама гидрология, то можно выделить достаточно много направлений:



Рис. 1.15. Разделы гидрологии.

Помимо общих дисциплин есть специфические направления и науки, например гидрография/ региональная гидрология, которая позволяет изучать особенности водных объектов в разных природных условиях. Еще один важный блок связан с инженерными исследованиями (инженерная гидрология) – здесь речь идет о гидрологических прогнозах. Ни одно строительство и ни один объект на берегах рек, озер, морей, океанов, хранилищ не возможен без основательных расчетов. Гидрометрия – наука, позволяющая изучать проведение измерений на водных объектах, т. е. используемые приборы, методики и подходы.



Рис. 1.16. Гидрология и смежные науки.

Основные этапы истории гидрологии

Если рассматривать крупные периоды развития гидрологической науки, то можно отметить, что в самом начале это было связано с решением прикладных задач: народы селились на берегах рек, использовали возможности от близости к этим объектам и одновременно испытывали с их стороны некую опасность. Это привело к тому, что народы были вынуждены изучать эти водные объекты, строить защитные сооружения (дамбы, водозаборы, водяные мельницы). Такие прикладные задачи были стимулом для развития гидрологических знаний – первые сведения о реальных исследованиях относятся к тысячелетию до н. э.

Длительное время происходило накопление данных, постепенно человек пришел к необходимости организации объектов наблюдения на станции. Такое наблюдение дало начало развитию гидрологической теории. Количественные принципы были заложены не так давно, о них мы поговорим позже в ходе курса.

В то время, когда в бассейне Невы еще не стаяли остатки последних ледников, египетские жрецы проводили самые разнообразные наблюдения за водным режимом реки Нил – делалось это с помощью ниломеров. В бассейне Нила известно приблизительно 20 из них.

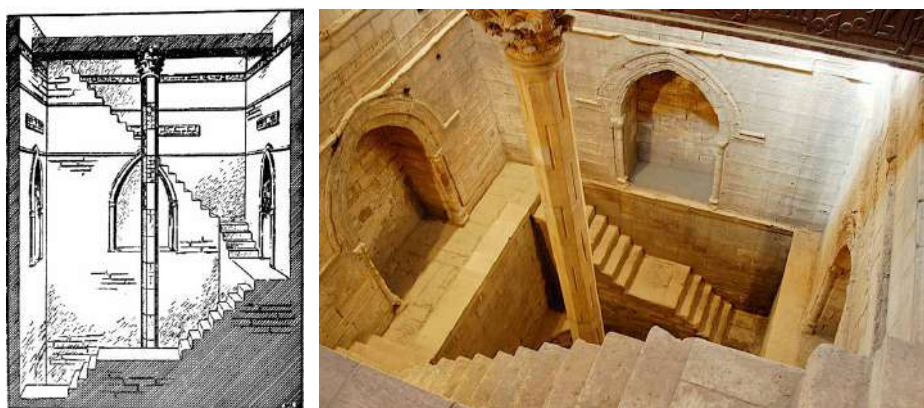


Рис. 1.17. Ниломеры Древнего Египта.

По изменению уровня Нила давался прогноз будущего урожая. Прогноз, в свою очередь, был связан с размером налогов, возможных для взимания в зависимости от количества продуктов, которые будут получены в конце сезона. Так, когда начинался подъем уровня

воды, гребцы отправлялись вниз по течению с целью сообщить в ниже расположенные населенные пункты о приближающейся волне паводка. Такой метод до сих пор используется в гидрологии и называется методом соответственных уровней.



Рис. 1.18. Родской ниломер.

В некоторых местах наблюдение за уровнем продолжается достаточно продолжительное время. По Родскому ниломеру сохранились данные наблюдений с 621 года н. э. Считается, что это самый длинный в мире ряд систематических измерений.



Рис. 1.19. Древние водоподъемные механизмы.

Дальнейшее развитие гидрологических знаний было связано с греками. Если египтяне заложили основы мониторинга за реками, то греки, будучи мудрецами и философами, задумались о происхождении водных источников и наблюдаемом круговороте воды. Один из таких мудрецов – Фалес Милетский (640/624 – 548/545 до н. э.). Фалес полагал, что:

- Все рождается из воды; все возникает из воды и в нее превращается;
- Начало элементов, сущих вещей – вода; начало и конец вселенной – вода;
- Все образуется из воды путем ее затвердевания/замерзания, а также испарения; при сгущении вода становится землей, при испарении – воздухом;
- Причина образования/движения – дух, «гнездящийся» в воде;
- Земля плавает в воде, а Солнце и другие небесные тела питаются испарениями этой воды.

Также весьма интересны труды Геродота (485-425 гг. до н. э.). В путешествиях он провел более 10 лет, объехал почти все известные страны своего времени: Грецию, Южную Италию, Малую Азию, Египет, Вавилон, Персию, посетил большинство островов Средиземного моря, побывал Черном море, в Крыму (вплоть до Херсонеса) и в стране скифов.

Римская цивилизация. Первый водопровод в Риме был построен в 313 г. до н. э. В самом начале нашей эры 9 водопроводов давали до 88 ведер воды на каждого жителя (и примерно 700 л в сутки), а в конце XIX в. идеальным считался расход в 12, 5 ведра на человека в сутки, средний расход воды на человека был равен 5,5 – 6,75 ведра в сутки (примерно 40 – 50 л). Большие достижения римлян в строительстве гидротехнических сооружений стали возможными благодаря изобретению ими бетона, в котором вода играет существенную роль, а также свинцовых и керамических водопроводных труб.

До сих пор сохранились такие сооружения как Понт-дю-Гар (Южная Франция) – мост через реку Гар, сооруженный незадолго до начала христианской эры, - стал составной частью 50-километрового акведука, поставлявшего питьевую воду в город Ним; и акведук в Сеговии (Испания).

Еще одна интересная историческая личность – Герон Александрийский (вероятно, I-II вв. н. э.). Он предложил объемный способ измерения расхода воды – так было установлено, что расход воды равен площади сечения, умноженной на скорость. Он придумал эолипил – прообраз первой известной нам паровой турбины, фонтаны, одомер.

Особую роль в древних гидрологических исследованиях играл Леонардо да Винчи (1452-1519). Он измерял скорость течения реки с помощью поплавков, размышлял над водой, огибающей препятствия и льющейся в бассейн, предлагал механизмы для работы на водных объектах (водолазные костюмы, драга и т. д.). Да Винчи принадлежит одно из самых первых правильных предположений о круговороте воды в природе. Перечень открытий и идей гения эпохи Возрождения, не считая его полотен, занимает более 7 тысяч страниц рукописей.

Как мы говорили, возникновение количественной гидрологии произошло существенно позже, в середине XVII в. Развитие количественных теорий было связано с работами нескольких ученых. Среди них – Пьер Перро (1611-1680), которому было поручено соорудить водопровод для Лувра. В процессе этой работы он фактически провел воднобалансовые расчеты. Он измерил отдельные элементы круговорота воды и доказал, что сумма осадков в одном из районов верхней части бассейна реки Сены по меньшей мере в шесть раз превышает расход воды вышележащего притока Сены, т. е. именно осадки обеспечивают так воды в реках. Из его же работ следовало, что часть влаги на сушу поступает с моря.

Другой исследователь – Эдм Мариотт (1620-1684) в своих трудах по гидродинамике пришел к большому числу важных заключений о течении жидкостей, о трубах и давлении внутри них, о равновесии жидких тел и т. д. На основании измерений и расчетов осадков, стока и испарения Эдм впервые установил количественные соотношения главных фаз круговорота воды.

Третий ученый – Эдмонд Галлей (1656-1724) первым измерил испарение с поверхности моря и прямо указал, что океан и есть источник водяного пара, порождающего осадки над сушей. Измерения и выводы из них стали возможны

благодаря появлению первых пунктов гидрологических и метеорологических наблюдений.

Термин «гидрология» впервые появился в книге Э. Мельхиора, изданной во Франкфурте-на-Майне (1694 г.).

Водные объекты и их типы. Понятие о гидросфере

Гидросфера – прерывистая водная оболочка планеты, образованная водными объектами.

Вводные объекты – скопления природных вод на земной поверхности и в верхних слоях земной коры, обладающих определенным гидрологическим режимом.

Три группы водных объектов – водотоки, водоемы и особые объекты.

Признаки водных объектов:

- Временное или постоянное наличие скоплений воды;
- Наличие водосбора;
- Наличие русла, котловины, водовмещающей среды.

Классификаций водных объектов достаточно много, в ходе курса мы будем пытаться получить их по разным признакам. Так, объекты можно разделить по местоположению:

- Надповерхностные;
- Поверхностные;
- Подземные.

И по времени существования:

- Постоянные;
- Временные.

Первый класс водных объектов – водотоки. Это водные объекты с поступательным движением воды в направлении уклона русла. К ним относятся:

- Реки;
- Ручьи;
- Каналы.

Водоемы – водные объекты в понижениях земной поверхности с замедленным движением воды. Типы:

- Океаны и моря;
- Озера;
- Водохранилища и пруды;
- Болота.

Третья рассматриваемая нами группа – особые водные объекты. К ним относятся:

- Ледники;
- Подземные воды;
- Атмосферная влага;
- Влага в живых организмах.

Подземные воды:

- Почвенная влага;
- Грунтовые и подземные воды;
- Артезианские (напорные) воды.

Сколько всего воды на Земле? Самая большая голубая сфера на рис. 1. 27 – это вся вода на нашей планете, включая ту, что находится внутри растений и тел животных и людей. Диаметр сферы равен 386 000 000 кубических километров.

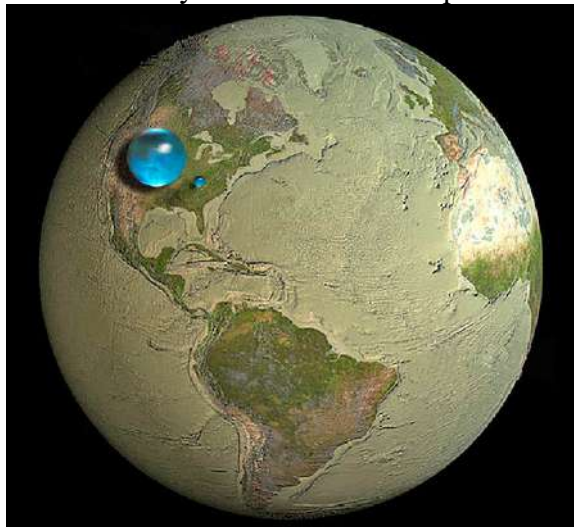


Рис. 1.20. «Сколько воды на Земле?».

Сфера меньшего объема – это жидкая пресная вода во всех реках, озерах, болотах и подземных водах. Ее объем – 10 633 450 кубических километров. Наконец, крошечная синяя точка – это пресная вода из всех озер и рек на планете, объем которой составляет 93 113 кубических метров.

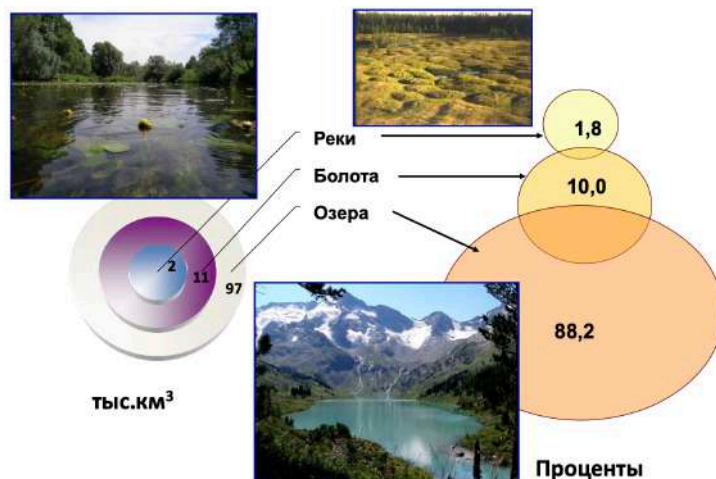


Рис. 1.21. Распределение пресной воды между озерами, болотами и реками.

За свою жизнь человек потребляет 75 тонн воды. Содержание воды в организме уменьшается с увеличением возраста. Так, если на начальных этапах оно составляет 97%, то к старости содержание воды уменьшается до 50-60%.



Рис. 1.22. Содержание воды в организмах.

Среди терминов, которые стоит обсудить на этой лекции, есть и гидрографическая сеть – совокупность водных объектов территории. Внутри гидрографической сети выделяют русловую (совокупность водотоков территории) и речную (наиболее крупные водотоки) сети.

Гидрологические характеристики и гидрологическое состояние водного объекта.

Гидрологический режим и процессы.

Описывая водные объекты, мы используем разные характеристики:

- Физические (плотность, температура, мутность, скорость перемещения, уклон водной поверхности);
- Химические (минерализация, соленость);
- Биологические (биомасса, численность организмов);
- Гидрологические (уровень воды, расход вещества, сток вещества, продолжительность гидрологических процессов);

Расход – количество вещества, теплоты, проходящее через некоторую площадь w за 1 с.

$$Q = w * v \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.1)$$

Сток W – количество вещества, теплоты, проходящее через некоторую площадь за период времени T .

$$W_Q = QT, \quad (1.2)$$

- Морфологические;
- Гидрографические.

Гидрологическое состояние водных объектов – совокупность характеристик водного объекта в данном месте и в данное время.

Гидрологический режим – закономерно повторяющееся изменение состояния водного объекта.

Пространственные масштабы гидрологических изменений имеют целый ряд уровней:

- Глобальный;
- Континентальный;
- Зональный;
- Региональный;
- Бассейновый;
- Локальный;
- Элементарный.

Временные масштабы гидрологических изменений также сильно варьируются:

- Вековой ($T > 100$ лет);
- Многолетний ($T = 1-100$ лет);
- Внутригодовой (сезонный) ($10 < T < 365$ дней);
- Кратковременный ($1 < T < 10$ дней);
- Внутрисуточный ($T < 24$ часов).

Гидрологические процессы – совокупность физических, химических, биологических процессов, определяющих закономерности формирования гидрологического состояния и режима водных объектов.

Лекция 2. Вода как вещество. Молекулярная структура. Изотопный состав. Свойства поверхностных вод

Введение

Это занятие будет посвящено особенностям воды, тому, как они проявляются в природных водных объектах, и в чем заключается экологическое значение различных аномалий воды.

«Я встретил меньше затруднений при открытии закона движения небесных тел, несмотря на их громадную удаленность, чем при исследовании текущей воды, которое происходит перед нашими глазами», – Г. Галилей.

Вода: химические и физические свойства

Вода – простейшее устойчивое в обычных условиях химическое соединение водорода с кислородом или оксид (окись) водорода (H_2O).

- Вещество бесцветное;
- Не имеет вкуса и запаха;
- Имеет изотопные разновидности.

Раскрытие загадки воды относится к началу XVIII в. В 1766 г. Генри Кавендишу (1731-1810) удалось получить в чистом виде водород и углекислый газ, установить их удельный вес и другие свойства. В 1781 г. Кавендиш определил состав воздуха, а в 1783 г., сжигая водород, установил химический состав воды, опровергнув представление об ее элементарности. Ученый также пытался установить массу «горючего газа» водорода. Он пришел к выводу, что легковоспламеняющийся воздух выходит в 8760 раз легче, чем вода, или в 11 раз легче, чем «обычный воздух». Водород, однако, в действительности в 14,4 раз легче воздуха.

Одним из последователей Кавендиша был Антуан Лоран Лавуазье (1743-1794), с 1774 г. он занимался изучением горения водорода или, как его называли тогда, «горючего воздуха», открытого в 1767 г. Кавендишем. Только в 1783 г. Лавуазье и Лаплас нашли искомое: продуктом горения водорода оказалась чистая вода. В феврале 1785 г. А. Лавуазье и Ж. Менье пришли к выводу, что вода содержит 85% кислорода и 15% водорода (по современным данным, 88,81% кислорода и 11,19% водорода).

Строение молекулы воды

Современное представление о строении молекулы воды относится к 30-м годам XX в. Было показано, что каждая молекула обладает двумя положительными и двумя отрицательными зарядами. Атом кислорода в молекуле воды присоединяет к себе два электрона, отнятых от атомов водорода, и тем самым приобретает отрицательный заряд. Лишенные электронов, оба атома водорода становятся положительно заряженными протонами. Поэтому молекула воды образует электрический диполь. Кроме того, молекула воды несимметрична (рис. 2.1) – это приводит к определенным аномальным свойствам.

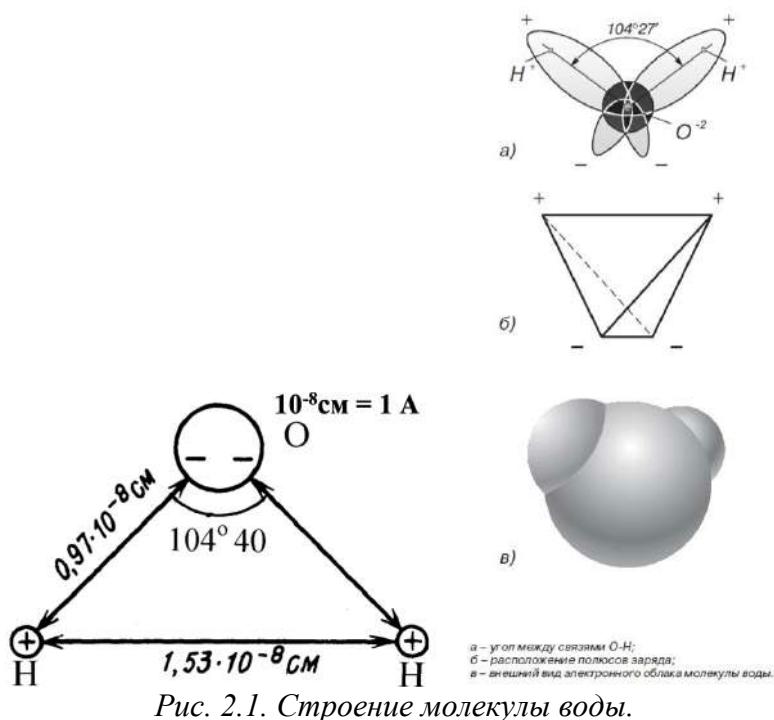


Рис. 2.1. Структура молекулы воды.

Водородные связи

Среди этих характеристик, во многом определяющих уникальные свойства воды, есть и наличие водородных связей. Молекула воды способна образовывать 4 таких связи. Две из них образует атом кислорода и две – атомы водорода. Наличием в воде водородных связей объясняется высокая упорядоченность молекул.

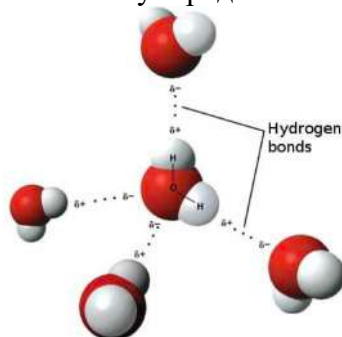
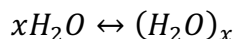


Рис. 2.2. Водородные связи.

Структурные модели воды и льда

Структура воды – результат взаимодействия молекул-диполей H_2O и наличия водородных связей.



В твердом состоянии формируется организованная и устойчивая структура (довольно рыхлая, но при этом ажурная). В дальнейшем, при переходе от твердого состояния к жидкому, структура начинает уплотняться, а плотность – расти. В этом заключается одна из аномалий воды.

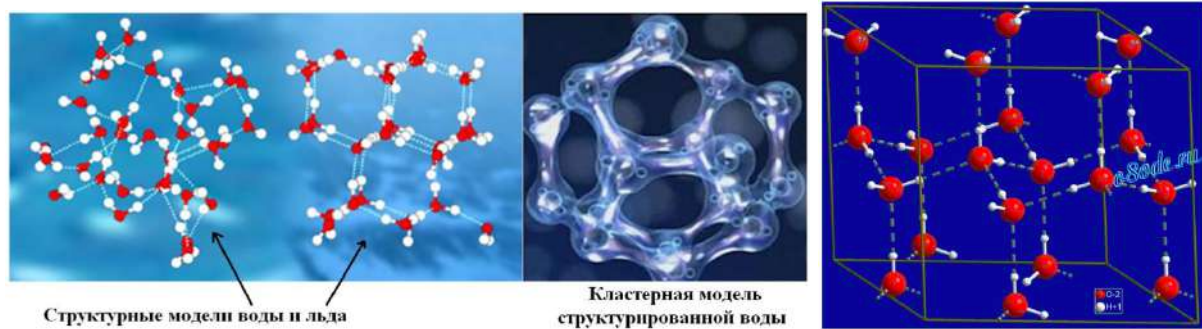


Рис. 2.3. Структурные модели воды и льда.

Увеличение плотности происходит до определенной температура, после чего плотность начинает уменьшаться. Сегодня мы обсудим одну из важнейших аномалий воды – изменение плотности в зависимости от температуры.

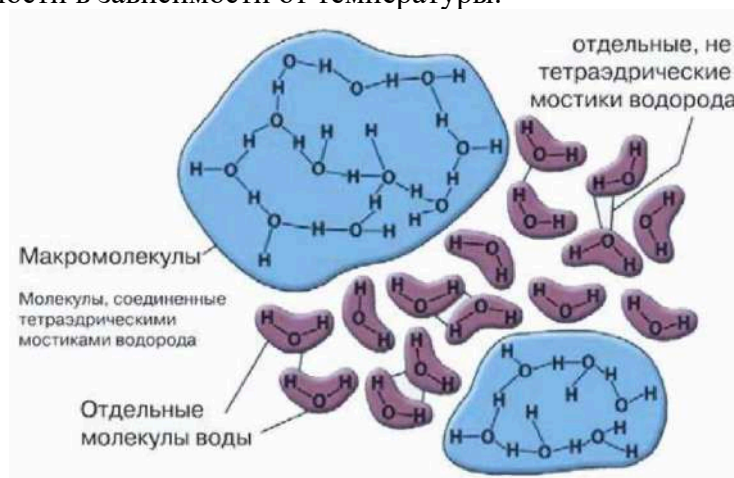


Рис. 2.4. Структура воды.

В жидком состоянии за счет водородных связей и дипольных взаимодействий могут образовываться многомoleкулярные структуры – ассоциаты и кластеры.

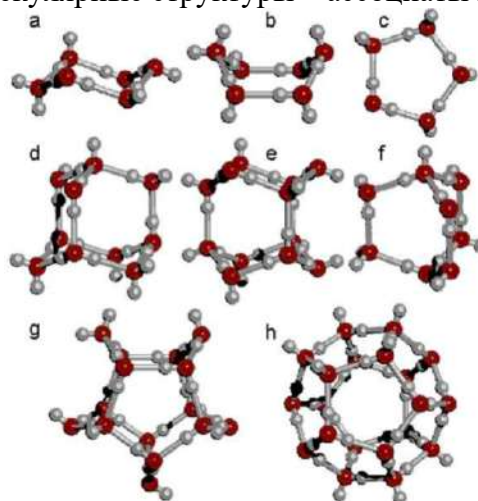


Рис. 2.5. Возможные кластеры воды.

Изотопный состав воды

Разновидности атомов одного и того же химического элемента, имеющие одинаковый заряд ядра, но разные массовые числа, называют изотопами. Изотопы

одного и того же элемента имеют одинаковое число протонов и электронов, а отличаются друг от друга только числом нейтронов. Водород и кислород имеют несколько природных изотопов. Устойчивые изотопы – изотопы, которые существуют длительное время без изменения своих свойств. Так, для водорода – это протий, дейтерий.

Основные разновидности воды	Процентное содержание в гидросфере
${}^1\text{H}_2 {}^{16}\text{O}$	99,74
${}^1\text{H}_2 {}^{18}\text{O}$	0,20
${}^1\text{H}_2 {}^{17}\text{O}$	0,04
${}^1\text{HD } {}^{16}\text{O}$	0,015

Рис. 2.6. Соотношение изотопных видов воды в гидросфере.

Виды воды

- Обычная вода (${}^1\text{H}_2 {}^{16}\text{O}$);
- Тяжелая вода ($\text{D}_2 {}^{16}\text{O}$);
- Сверхтяжелая вода ($\text{T}_2 {}^{16}\text{O}$).

Свойства тяжелой воды

Физические свойства	D_2O	H_2O
Молекулярная масса	20	18
Плотность при 20 °C (г/см ³)	1,1050	0,9982
T кристаллизации (°C)	3,8	0
T кипения (°C)	101,4	100

Тяжелая вода на 10% плотнее обычной, ее вязкость выше на 23%. Она кипит при 101,42оС, а замерзает при +3.8оС. Химические реакции в её среде проходят несколько медленнее, по сравнению с обычной водой, водородные связи с участием дейтерия несколько сильнее обычных.

Изотопия природных вод

- Речные, озерные, грунтовые и морские воды различаются по изотопному составу;
- В 1 т речной воды присутствует около 150 г тяжелой. В воде океанов и озер ее чуть больше: на 1 т приходится 165 г.;
- Самая легкая вода – вода антарктических ледников;
- Самая тяжелая – подземные воды газовых месторождений;
- В замкнутых водоемах тяжелой воды больше;
- Атмосферная влага обогащается дейтерием, поэтому дождевая вода богата тяжелым водородом.

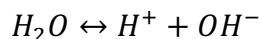
Одна из главных причин, приводящих к различию изотопного состава природных вод, — это процесс испарения. В результате испарения происходит некоторое

обогащение воды более тяжелыми изотопами, а в результате конденсации – более легкими. Поэтому поверхностные воды, формирующиеся атмосферными осадками, «тяжелого» водорода (3H) и кислорода (^{18}O) меньше, чем океанические воды. В процессе круговорота воды происходит фракционирование ее изотопного состава.

Природные воды, их классификация

Вода – слабый электролит. Среди ее характеристик:

- Ионное равновесие;



- Константа ионного равновесия;

$$k = [H^+][OH^-]$$

- Водородный показатель – логарифм содержания водородных ионов в воде (моль/л).

$$pH = -\lg(H^+)$$

Смысл величины pH :

- В обычном диапазоне изменения температуры воды константа ионного равновесия;

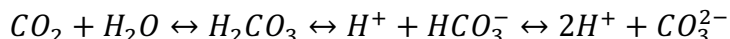
$$k = [H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

$$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$$

- Причина использования водородного показателя pH – простота измерений.

Механизм изменения pH :

- Карбонатное равновесие;



- Добавление ионов водорода (сильных кислот) смещает равновесие влево, увеличивает содержание иона H^+ , уменьшает величину pH (пример: $-\lg(10^{-5}) = 5 = pH$);
- Добавление оснований смещает равновесие вправо, уменьшает содержание иона H^+ , увеличивает величину pH (пример: $-\lg(10^{-9}) = 9 = pH$).

Изменение водородного показателя и реакция водной среды:

Величина $pH = -\lg(H^+)$	Реакция среды
< 7	Кислая
7	Нейтральная
> 7	Щелочная

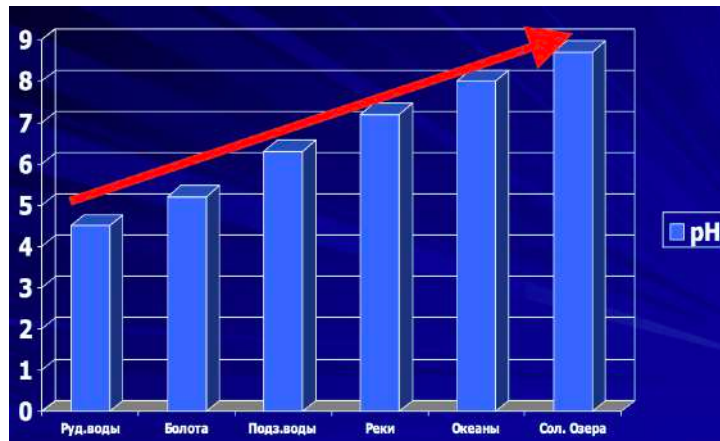


Рис. 2.7. Соотношение величины pH в различных водных объектах.

Продолжая разговор о химических свойствах воды, следует отметить, что вода – хороший растворитель, причина заключается в дипольности молекулы воды. Практически все элементы в той или иной степени растворяются в воде, поэтому ее можно считать слабым раствором. Для воды характерна аномально большая диэлектрическая постоянная (это также приводит к тому, что она хорошо растворяет разные вещества).

Характеристики содержания в воде растворенных веществ

- Минерализация M (кг/м³ или г/л);
- Соленость S (г/кг, ‰ – промилле);
- При небольшом насыщении раствора $M = S$ (1 г/л = 1 г/кг = 1 ‰);
- При большом насыщении раствора они не равны 1г/л \neq 1‰.

Классификация природных вод

- По содержанию растворенных веществ

Тип природных вод	Минерализация s , г/л	Соленость S , ‰
Пресные	< 1	< 1
Солоноватые	1-25	1-25
Соленые	25-50	25-50
Рассолы	> 50	> 50

- По минерализации

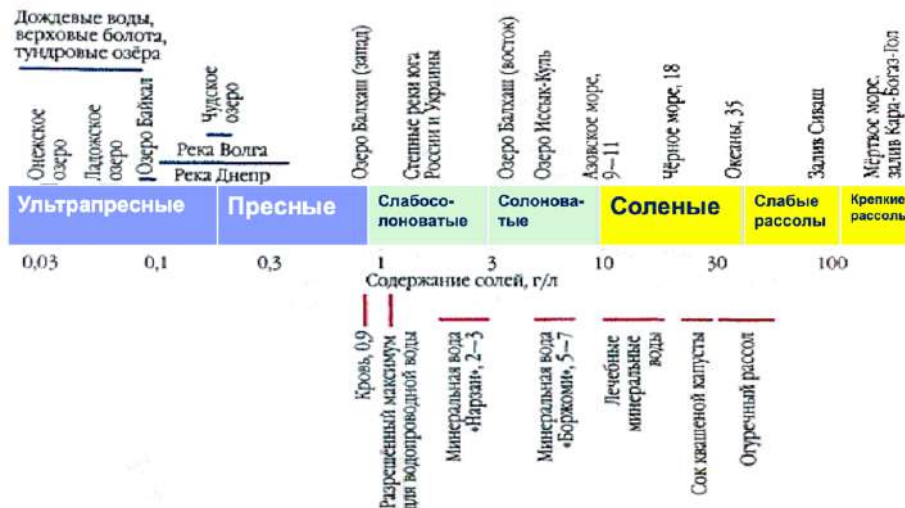


Рис. 2.8. Классификация природных вод по минерализации.

Границы между типами природных вод:

- При $s < 1$ г/л воду можно использовать в питьевых целях;
- Солености $S = 24,7$ (~25,0) ‰ соответствует равенство температуры максимальной плотности и замерзания воды;
- Соленость морской воды < 50 ‰.

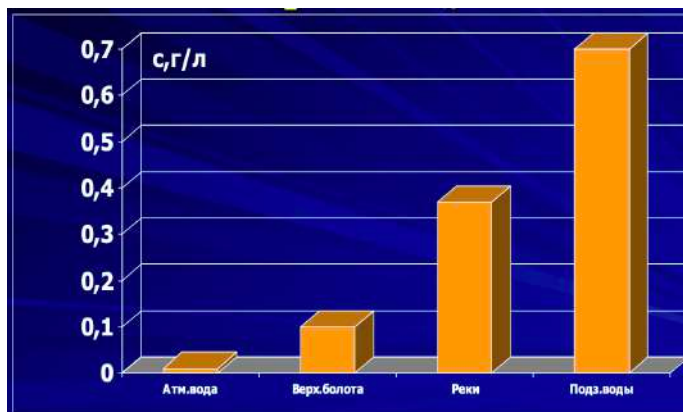


Рис. 2.9. Отличия пресных водных объектов по величине минерализации.

Ранее мы отмечали, что большинство веществ в той или иной степени растворимы в воде. Механизмом растворения многих кристаллических солей является гидролитическая диссоциация, когда молекула соли распадается на ионы с положительным и отрицательным зарядом – на катионы и анионы.

Состав вод

- Неорганические (соли);
- Биогенные;
- Органические;

- Микроэлементы;
- Газы.

Среди неорганических веществ (солей) можно выделить следующие категории:

- Главные ионы, катионы и анионы;
- Основные анионы: HCO_3^- (гидрокарбонатный), SO_4^{2-} (сульфатный), Cl^- (хлоридный);
- Основные катионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ .

Когда «лидеры» определены, природные воды также можно поделить по преобладанию тех или иных ионов. По содержанию анионов и катионов выделяются классы (по преобладающему аниону) и группы (по преобладающему катиону).

Классы:

- Гидрокарбонатный;
- Сульфатный;
- Хлоридный.

Группы:

- Кальциевая;
- Магниева;
- Натриевая.

Характерное соответствие природных вод и преобладающих ионов растворенных солей:

Типы природных вод	Преобладающие ионы
Пресные	$H_3SiO_4^-$, HCO_3^- , Ca^{2+}
Солоноватые	SO_4^{2-} , Mg^{2+}
Соленые	Cl^- , Na^+

Водные объекты и их гидрохимические особенности

Водные объекты	Гидрохимическая характеристика
Влага в атмосфере, ледники, реки, озера, пресные подземные воды	Гидрокарбонатный класс, кальциевая группа
Солоноватые подземные воды	Сульфатный класс, магниевая группа
Океаны и моря	Хлоридный класс, натриевая группа

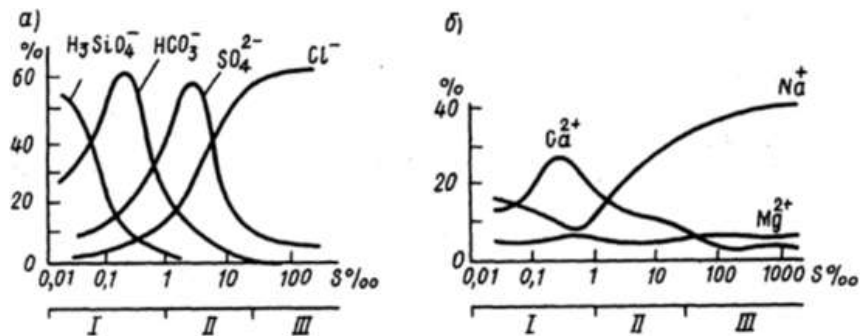


Рис. 2.10. Зависимость содержания главных анионов (а) и катионов (б) в солевом составе природных вод (в %) от солености воды, по М. Г. Валяшко: воды: I – пресные, II – солоноватые, III – соленые.

Так, мы рассмотрели соли в воде, перейдем к следующей группе: биогенные вещества в водных объектах.

- Азот (N);
- Фосфор (P);
- Кремний (Si).

Вещества поступают из атмосферы, грунтов, путем разложения сложных органических соединений. Часть поступает за счет промышленных и бытовых стоков.

Следующая группа – органические вещества:

- Углеводы;
- Белки;
- Липиды (жирные кислоты);
- Гуминовые вещества;
- Нефтяные углеводороды.

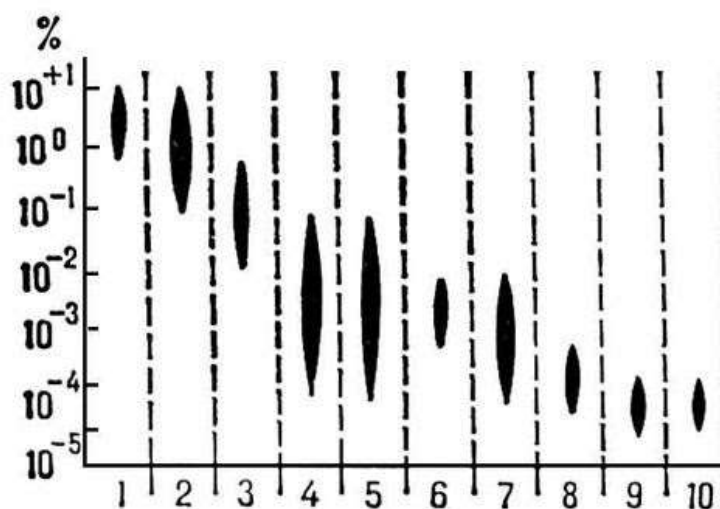


Рис. 2.11. Содержание органического вещества в различных природных объектах: 1 – почвы, 2 – морские и океанические илы, 3 – горные породы, 4 – подземные воды, 5 – почвенные растворы, 6 – поровые растворы, 7 – иловые растворы, 8 – поверхностные воды суши, 9 – морские воды, 10 – атмосферные осадки.

Микроэлементы:

- Бром (Br), йод (I), фтор (F), литий (Li), барий (Ba);
- Тяжелые металлы (железо (Fe), никель (Ni), цинк (Zn), кобальт (Co), медь (Cu), кадмий (Cd), свинец (Pb), ртуть (Hg));
- Радиоактивные изотопы (калий (^{40}K), рубидий (^{87}Rb), уран (^{238}U), радий (^{226}Ra), стронций (^{90}Sr), цезий (^{137}Cs)).

Последняя группа – загрязняющие вещества:

- Нефтепродукты;
- Ядохимикаты;
- Удобрения;
- Моющие средства;
- Микроэлементы;
- Радиоактивные вещества.

Источники растворенных веществ имеют как природный, так и техногенный характер.

Качество воды

Качество воды (КВ) – совокупность природных и химических свойств природной воды, определяющая ее пригодность для конкретного водопользования.

- Характеристика токсичности (по отношению к живым организмам) и/или пригодности для хозяйственных целей;
- КВ зависит от изменения стока воды, наносов, химических веществ, биологических субстанций, тепла;
- КВ может лимитироваться природными факторами;
- КВ ухудшается под влиянием техногенного загрязнения вод.

Агрегатные состояния воды. Фазовые переходы

Фазовые состояния воды:

- Газообразное (пар);
- Жидкое (вода);
- Твердое (лед).

Зависимость агрегатного состояния воды от давления и температуры выражается диаграммой состояния воды или фазовой диаграммой.

Фазовый переход – изменение агрегатного состояния. Фазовые переходы сопровождаются выделением или поглощением тепла.

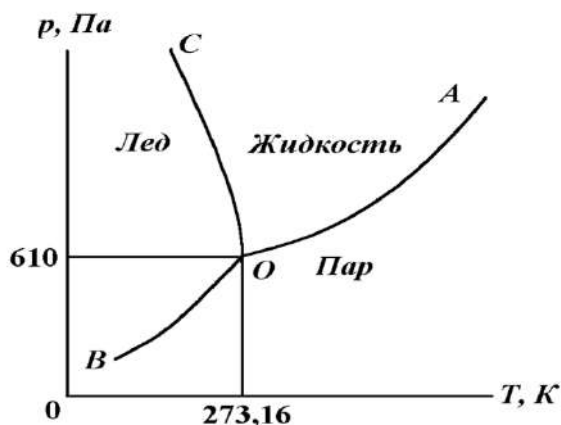


Рис. 2.12. Упрощенная диаграмма состояния воды.

В реальности диаграмма состояния воды сложнее, это связано с выделением различных модификаций льда (они существуют только при определенных условиях).

Рассмотрим характеристики фазовых переходов:

- Кривая плавления – плавление льда и кристаллизации воды;
- Температуры плавления льда и замерзания воды аномально велики;
- При кристаллизации воды теплота выделяется, а при плавлении льда (снега) – затрачивается.

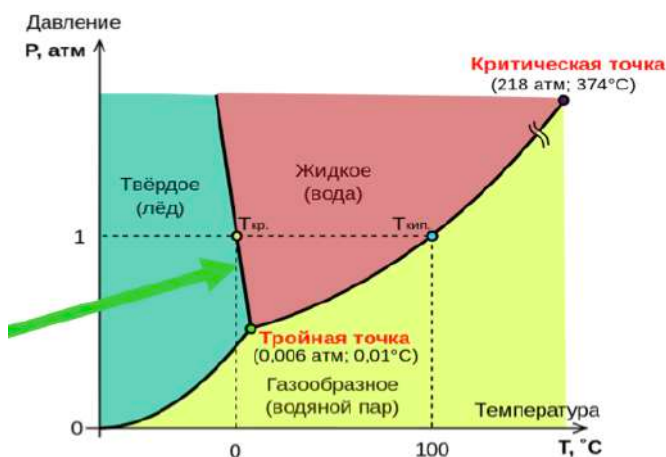


Рис. 2.13. Кривая плавления.

Любопытное следствие уменьшения температуры замерзания с увеличением давления, таяние льда в основании ледников начинается при отрицательной температуре.

Следующая характеристика – кривая парообразования:

- Кривая парообразования – кипение воды и конденсация;
- Температура кипения – функция давления;
- При конденсации водяного пара теплота выделяется, а при испарении воды – затрачивается.

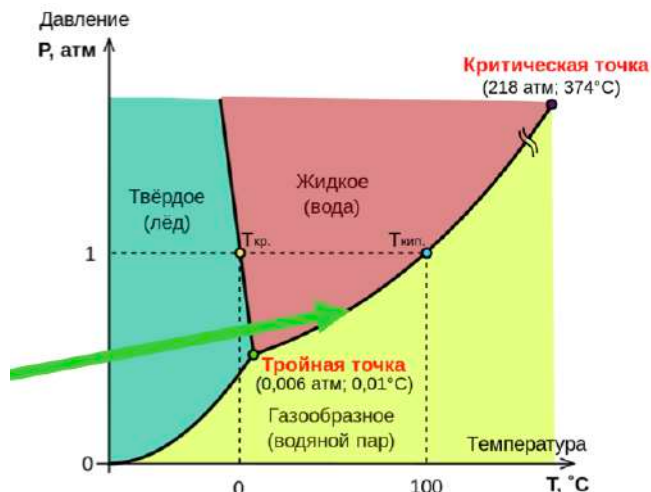


Рис. 2.14. Кривая парообразования.

Третья кривая – кривая сублимации:

- Кривая сублимации – сублимация водяного пара и испарение снега (возгонка);
- При сублимации пара теплота выделяется, а при испарении снега (льда) – затрачивается.

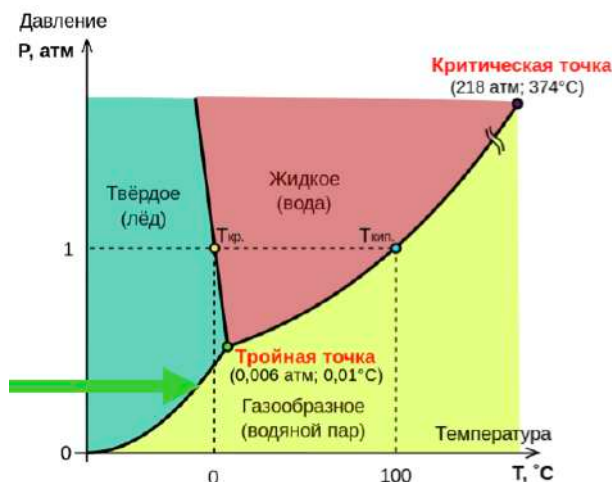


Рис. 2.15. Кривая сублимации.

Плотность воды и ее зависимость от различных параметров

Плотность воды обуславливает многочисленные процессы в водных объектах. Ее изменение приводит к возникновению различных плотностных течений, это способствует перемещению тепла и других субстанций.

- $\rho = m/V$, m – масса воды (кг), V – объем воды (m^3);
- $\rho = f(t, S, p, \dots)$, t – температура воды ($^{\circ}C$), S – соленость (‰) или минерализация (г/л), p – давление.

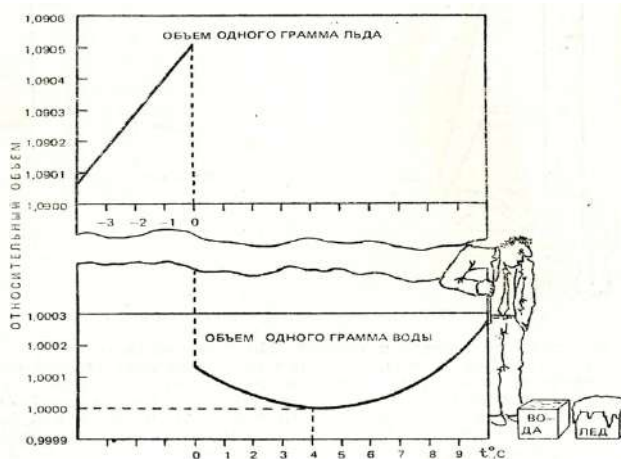


Рис. 2.16. Зависимость объема воды и льда от температуры.

Зависимость, выраженная на рис. 2.17, характерна не для всех жидкостей. Так, на рисунке изображены две особенности воды: скачкообразное и значительное изменение объема (и, соответственно, плотности) при переходе от твердого состояния к жидкому, а также сложное изменение плотности от 0 до 4⁰C и свыше 4⁰C (4⁰C – граница, показывающая изменение плотности).

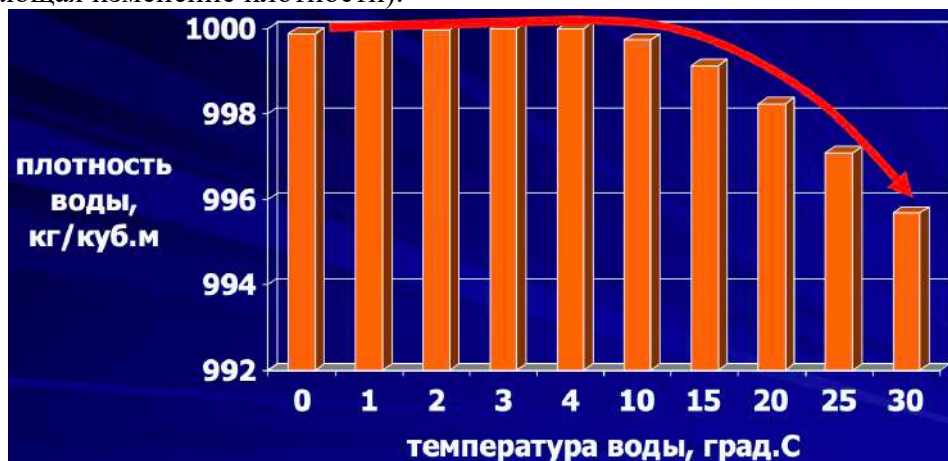


Рис. 2.17. Зависимость плотности от температуры воды.

Аномалии плотности воды:

- Плотность льда при -20⁰C равна 920 кг/м³.
- Плотность воды при 0⁰C равна 999,78, а льда – 917 кг/м³ (водоемы не промерзают до дна, при замерзании объем воды увеличивается до 11%);
- При повышении температуры от 0 до 4⁰C плотность воды в диапазоне увеличивается;
- Максимальная плотность характерна для каждого жидкого состояния воды. Она наблюдается при $T = 4^{\circ}\text{C}$ (1000 кг/м³);
- При дальнейшем увеличении T плотность воды уменьшается.

Причины аномального изменения плотности воды: наличие структуры воды и способность ее молекул образовывать упорядоченные ассоциации.

Главное следствие аномального изменения плотности воды:

- Плавуность льда (лед защищает водные объекты от переохлаждения);
- Перемешивание водных объектов (при $T=4^{\circ}\text{C}$) и отсутствие вертикальной конвекции (при $T < 4^{\circ}\text{C}$ и $T > 4^{\circ}\text{C}$).

Перемешивание – процесс приведения водной массы к однородному состоянию.

Вертикальное перемешивание (конвекция) имеет следующие характеристики:

- Возникает при уменьшении плотности воды по глубине $\rho_2 - \rho_1 < 0$, ρ_1 - плотность верхнего слоя, ρ_2 – плотность нижнего слоя;
- В водоемах умеренной зоны возникает дважды в год: весной и осенью (при переходе T через 4°C).

На основе рис. 2.18 можно определить условия возникновения осенней конвекции.

Начальные условия:

- $T > 4^{\circ}\text{C}$, $\rho < 10000 \text{ кг/м}^3$;
- $\frac{dT}{dy} < 0$, $\frac{d\rho}{dy} > 0$;
- Устойчивая стратификация, перемешивание отсутствует.

Условия перемешивания:

- $T \geq 4^{\circ}\text{C}$, $\rho \leq 1000 \text{ кг/м}^3$;
- $\frac{dT}{dy} \geq 0$, $\frac{d\rho}{dy} \leq 0$;
- Неустойчивая стратификация, интенсивное перемешивание воды, гомотермия.

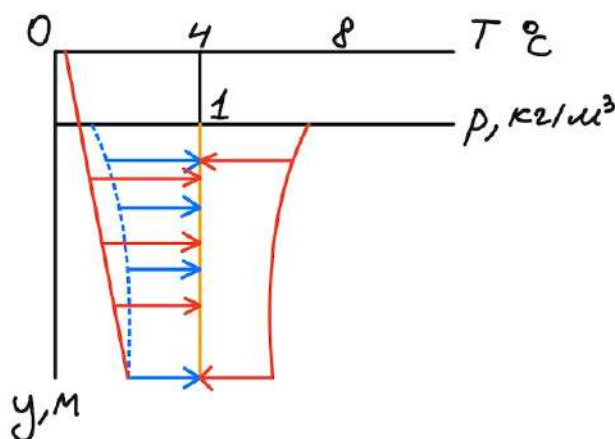


Рис. 2.18. Графическое изображение рассматриваемого случая.

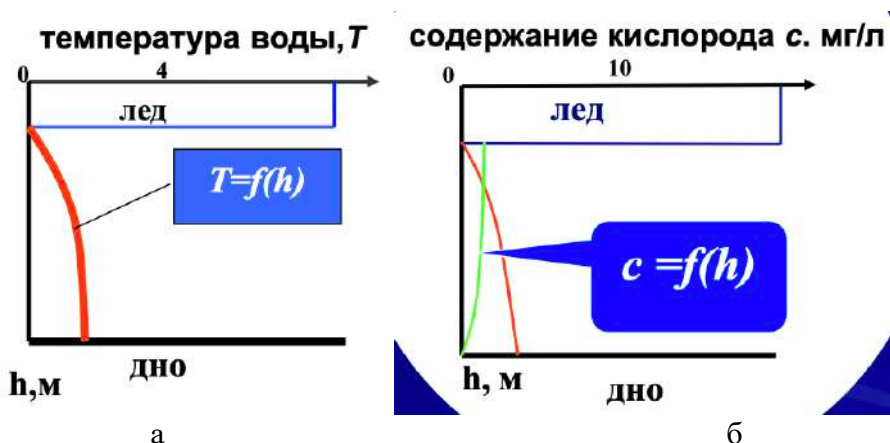


Рис. 2.19. Экологическая роль плавучести льда и отсутствия конвекции при $T < 4$ а) жизнь гидробионтов б) заморные явления.

Вторая характеристика при влиянии температуры на плотность – минерализация/соленость. При увеличении солености температура наибольшей плотности становится отрицательной.

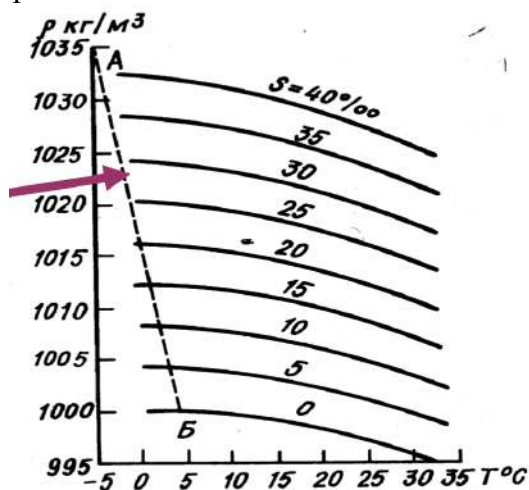


Рис. 2.20. Зависимость плотности воды от температуры и солености при нормальном давлении (пунктирная линия отображает изменение максимальной плотности).

Уравнение состояния морской воды:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T + \beta S), \quad (2.1)$$

где S – соленость воды в ‰, T – температура воды в $^{\circ}\text{C}$, ρ_0 – плотность воды при $T=4^{\circ}\text{C}$ и $S=0\text{‰}$, α и β – коэффициенты. Температура наибольшей плотности: $4 - 0,215 S$.

Третья характеристика – давление. Хотя сжимаемость воды очень мала, на больших глубинах в океане она все же сказывается на плотности воды. На каждые 1000 м глубины плотность возрастает на 4,5-4,9 $\text{кг}/\text{м}^3$ вследствие влияния давления столба воды. Поэтому на максимальных океанских глубинах (около 11 км) плотность воды будет приблизительно на 48 $\text{кг}/\text{м}^3$ больше, чем на поверхности, и при $S = 35\text{‰}$ составит около 1076 $\text{кг}/\text{м}^3$. Если бы вода была совершенно несжимаемой, уровень Мирового океана был бы на 30 м выше, чем в действительности.

Тепловые свойства воды

- Удельная теплота плавления и парообразования аномально высоки;
- При 0°C соответственно равны $0,333 \cdot 10^6$ Дж/кг и $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг;
- При увеличении температуры эти характеристики уменьшаются;
- Удельная теплоемкость воды при температуре 15°C равна 4190 Дж/(кг \cdot $^{\circ}\text{C}$).

Вернемся к характеристике температуры наибольшей плотности и температуре замерзания. Рассмотрим закономерности, изображенные на графике Хелланд-Хансена (рис. 2.21), они объясняют целый ряд процессов, происходящих в океане и поверхностных водах.



Рис. 2.21. Зависимость Хелланд-Хансена.

Смысл графика Х-Х раскрывается на рис. 2.22. Пусть осенью в водоеме с солоноватой водой происходит процесс охлаждения. Достигается температура большей плотности (верхние слои более плотные, чем нижние), и в водоеме начинается перемешивание – оно будет продолжаться до тех пор, пока температура не станет равна температуре замерзания. Так:

- При $T_з < T_{мп}$ существует конвекция;
- Если $S < 24,7\text{‰}$, она продолжается до $T_з = T_{мп}$;
- Если $S > 24,7\text{‰}$, перемешивание продолжается до замерзания воды.

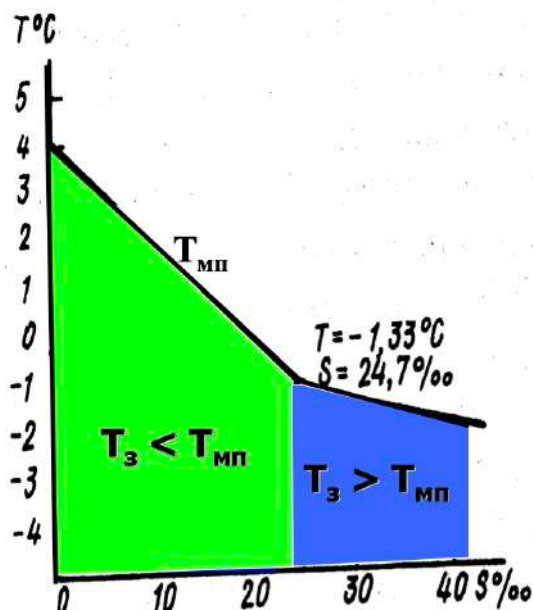


Рис. 2.22. Смысл графика Хелланд-Хансена.

Физические аномалии воды и их гидрологическое значение

Практически все свойства воды аномальны, а многие из них не подчиняются логике тех законов физики, которые управляют другими веществами.

	Характеристика	Аномальность	Значение
1	Температура плавления (замерзания)	Очень высока	Появление снега и льда при относительно высоких T
2	Температура испарения (кипения)	Очень высока	Существование водных объектов при относительно высоких T

Аномальность положения точек кипения и замерзания воды также связана с ее молекулярными свойствами: на разрыве формирующихся водородных связей между молекулами воды требуется относительно большая энергия, чем в случае более массивных молекул гидридов S, Se, Te .

Точка замерзания самого маленького по массе гидрида должна быть равна $-90^{\circ}C$, а точка кипения – около $-75^{\circ}C$. При давлении 500 атм. вода замерзает при $-4^{\circ}C$, а при 2200 атм. – при $-22^{\circ}C$. Эта аномалия спасает жизнь многим обитателям морских глубин.

	Характеристика	Аномальность	Значение
3	Удельная теплота плавления (кристаллизации)	Очень велика	пониженная интенсивность процессов таяния льда и замерзания воды
4	Удельная теплота испарения (конденсации)	Очень велика	пониженная интенсивность процессов испарения и конденсации
5	Плотность льда	Меньше плотности воды	Плавающий лед защищает водные объекты от переохлаждения
6	Температура максимальной плотности	Наступает не в момент замерзания, а	Прекращение перемешивания при $T < 40^{\circ}C$ и защита водных объектов от переохлаждения

		при более высокой температуре	
--	--	-------------------------------	--

Скрытая удельная теплота плавления (80 кал/г) выше, чем у твердых элементов: железа (6 кал/г), серы (9,5 кал/г), свинца (5,5 кал/г). Именно потому, что большой объем воды трудно быстро разморозить, а огромные ледники тают достаточно медленно, наша планета застрахована от резких последствий подобного рода катастроф.

Экологические последствия:

- Лед не тонет и спасает обитателей водоемов от замерзания;
- Замерзание воды происходит внезапно скачкообразно, при этом ее плотность резко снижается более, чем на 8%, а объем также резко возрастает примерно на 11%;
- В замкнутом пространстве избыточное давление, возникающее при замерзании воды, может достигать 2,5 т/см². В итоге формируются россыпные месторождения полезных ископаемых; твердые вещества и микроэлементы, содержащиеся в породах, растворяются. В воде и входят в состав плодородных почв; рождаются специфические ландшафты и типы морских берегов;
- При отсутствии центров кристаллизации в полной неподвижности вода может охлаждаться, не замерзая до -70⁰С (!). при аналогичных идеальных условиях воду можно нагреть до 150⁰С без закипания, но в этом случае достаточно одного пузырька воздуха, чтобы температура воды понизилась до 100⁰С, и она мгновенно вскипела.

	Характеристика	Аномальность	Значение
7	Удельная теплоемкость	Очень велика	Вода медленно нагревается и медленно охлаждается
8	Теплопроводность	Очень мала	Вода медленно нагревается и медленно охлаждается

- При нагревании жидкой воды от 0 до +35⁰С, ее удельная теплоемкость, в отличие от «нормальных» веществ (кроме ртути), уменьшается и только затем начинает расти;
- Теплоемкость воды в 5-30 раз выше, чем у других веществ (кроме водорода и аммиака). Вода нагревается в 5 раз медленнее, чем песок, но при этом она сохраняет тепло во столько же раз дольше.

Среди существующих в природе жидкостей вода обладает наибольшей теплоемкостью. Это предопределяет ее большое влияние на климат. Отсутствие водоемов на местности обычно приводит к образованию резко континентального климата.

Эффект гелиотермии – распределение температуры и солености по глубине. С увеличением содержания в воде солей удельная теплоемкость воды слабо уменьшается. Поэтому удельная теплоемкость морской воды меньше, чем пресной.

Рассмотрим сравнение поведения плотности, сжимаемости и теплоемкости воды (сплошная линия на рис 2) и обычной жидкости. Плотность после $+4^{\circ}\text{C}$ убывает, а у обычной жидкости растет. Со сжимаемостью и теплоемкостью наблюдается обратная ситуация

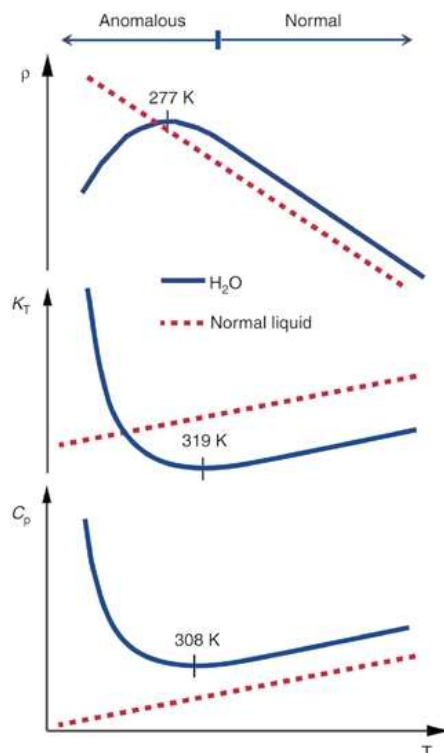


Рис. 2.23. Сравнение поведения плотности, сжимаемости и теплоемкости воды и обычной жидкости.

	Характеристика	Аномальность	Значение
9	Диэлектрическая постоянная	Очень велика	Высокая растворяющая способность воды
10	Вязкость	Мала	Текучесть воды, способность переносить взвешенные частицы, растворенные вещества

При повышении температура от 0 до 100°C , динамическая вязкость снимается более, чем в 6 раз (у ртути – всего в 1,4 раза), а вязкость водяного пара при той же температуре в 180 раз меньше, чем у воды. Это качество определяет способность (скорость) фильтрации жидкости через пористые среды. Малая вязкость воды предопределяет высокие скорости диффузии и интенсивности биологических процессов.

	Характеристика	Аномальность	Значение
11	Поверхностное натяжение	Очень велико	Перемещение воды по капиллярам и питание растений, эродирующая роль капель дождя

Самая плотная пленка поверхностного натяжения – у ртути. Чтобы ее разорвать, нужно приложить усилие 500 дин/см. Вода стоит на втором месте по показателю среди жидкостей (72 дин/см). При температуре 15°C высота капиллярного подъема в крупном песке может составить 2 м в течение 5-10 суток, а в глине – 12 м за 16 месяцев.

Открытие новых свойств воды в последнее время

- Асимметрия в переносе ионов водорода и гидроксила;
- Обнаружены признаки того, что жидкая вода на самом деле может существовать в разных состояниях;
- Переохлажденная вода замерзает при различных температурах в зависимости от того, положительно или отрицательно заряжена поверхность, с которой соприкасается вода;
- Ученые выяснили минимальную температуру, при которой вода теоретически может оставаться жидкостью: -48°C !

Лекция 3. Физические основы процессов в гидросфере

Физические основы процессов в гидросфере.

Основные физические законы, свойственные любым природным объектам:

- Закон сохранения вещества;
- Закон сохранения энергии;
- Закон сохранения количества движения.

Закон сохранения вещества справедлив для закрытых физических систем. Уравнение баланса вещества – форма этого закона для любого водного объекта (открытой системы). Применительно к открытым природным системам, какими являются водные объекты, закон сохранения вещества определяет равновесие между приходом, расходом вещества и изменением его массы в пределах объекта. Это относится не только к воде, но и к находящимся в ней насосам (взвесям), солям, газам и другим веществам.

Отличия закрытых и открытых систем:

- Закрытые системы не имеют массо- и энергообмена с окружающей средой;
- Открытые системы могут обмениваться веществом и энергией с окружающей средой.

Виды уравнения баланса вещества:

- Воды;
- Наносов;
- Химических веществ;
- Биологических субстанций.

Уравнение баланса вещества для водного объекта

Условно изобразим водный объект в виде кубика (рис. 3.1). M_1 – поток вещества, который приходит внутрь водного объекта. M_2 – поток выходящего вещества.

$$M_2 - M_1 = dM = -dm \quad (3.1)$$

$dM > 0,$	$dm < 0,$	m – уменьшается
$dM < 0,$	$dm > 0,$	m – возрастает
$dM = 0,$	$dm = 0,$	m – не меняется

dM – разность между выходящими M_2 и входящими M_1 потоками вещества, dm – изменение количества вещества в системе.

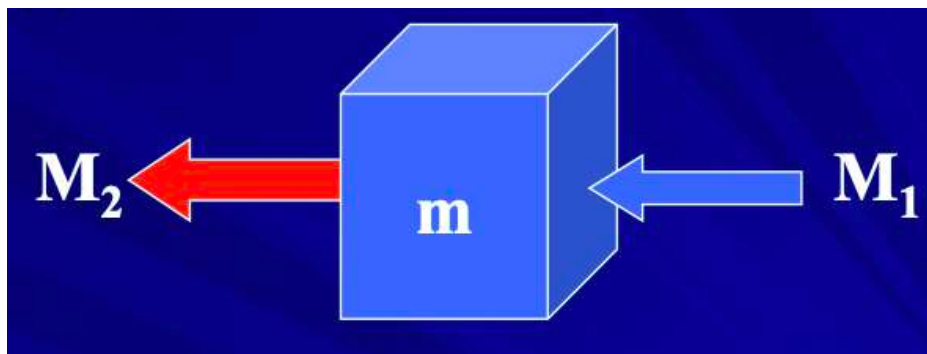


Рис. 3.1. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Полученное уравнение можно расписывать для разных случаев, рассмотрим один из них – случай, связанный с изменением баланса объемов и уровня воды. Для этого изучим озеро, выраженное в цилиндрической форме (рис. 3.2).

$$\Phi_2 - \Phi_1 = dM < 0 \text{ и } dm > 0 \quad (3.2)$$

Уровень воды H повышается.

$$dM = -dm = -pdV = -pFdH = -pFH_2 + pFH_1 = pF(H_1 - H_2), \quad (3.3)$$

Плотность воды $p = const$.

$$\Phi_2 - \Phi_1 = dM > 0 \text{ и } dm < 0 \quad (3.4)$$

Уровень воды H снижается.

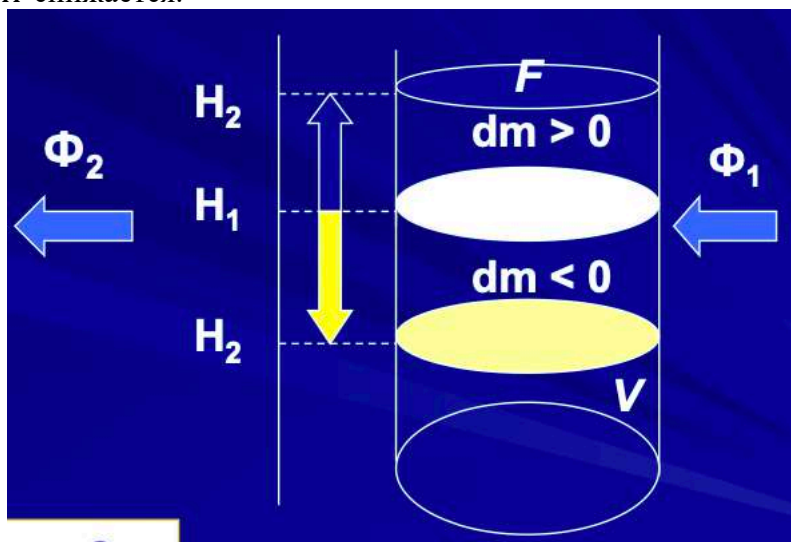


Рис. 3.2. Графическое изображение рассматриваемого случая.

- Уравнение баланса вещества универсально. Структура уравнения не зависит от вида вещества, типа водного объекта или его размера;
- Водные объекты отличаются между собой по знаку результирующей баланса dM ;
- Они могут также отличаться по набору причин появления результирующей баланса;

Причины изменения потоков воды:

К причинам относятся:

- Выпадение дождя и/или снега;

- Таяние снега и/или льда;
- Испарение воды и конденсация влаги;
- Фильтрация и разгрузка подземных вод;
- Водозабор и/или водоотведение (сброс сточных вод).

Причины изменения потоков минеральных частиц в водных объектах:

- Эрозия почв;
- Русловые процессы;
- Береговые процессы и заиление водоемов;
- Осыпи, обвалы, оползни;
- Сели;
- Эоловый перенос вещества;
- Природопользование и защитные мероприятия.

Уравнение теплового баланса для водного объекта

Пусть Φ_1 – количество теплоты, поступающее в водный объект, а Φ_2 – количество теплоты, уходящее из объекта.

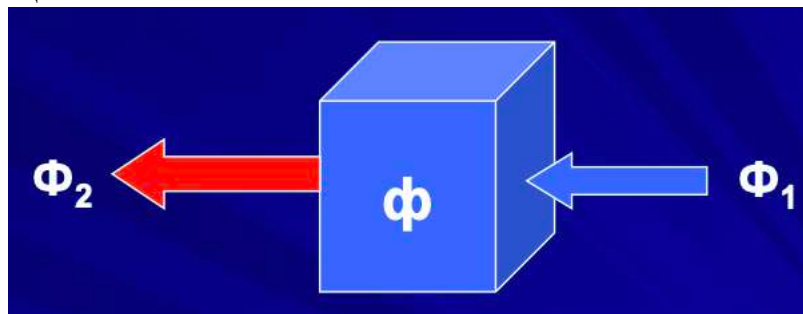


Рис. 3.3. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Тогда:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = d\Phi = -d\phi \quad (3.5)$$

$d\Phi > 0,$	$d\phi < 0,$	ϕ – уменьшается
$d\Phi < 0,$	$d\phi > 0,$	ϕ – возрастает
$d\Phi = 0,$	$d\phi = 0,$	ϕ – не меняется

Изменение теплосодержания также можно записать через следующую формулу:

$$d\Phi = -d\phi = -C_p p V dT, \quad (3.6)$$

где V – объем воды (м^3), C_p – теплоемкость, Дж/(кг $^\circ\text{C}$), dT – изменение температуры ($^\circ\text{C}$), p – плотность (кг/м 3).

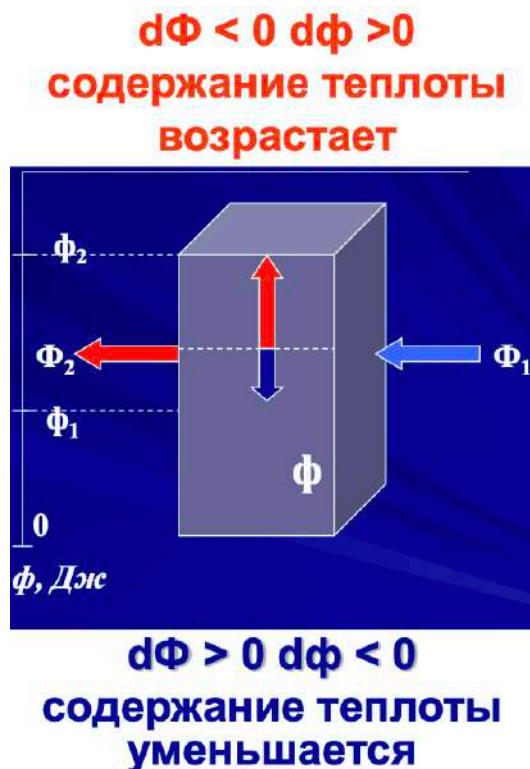


Рис. 3.4. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Причины изменения содержания теплоты:

- Поглощение прямого и рассеянного излучения Солнца;
- Теплообмен с атмосферой;
- Теплообмен с дном;
- Поступление или затраты теплоты на фазовые переходы;
- Диссипация гидравлической энергии;
- Сброс подогретых или охлажденных вод.

Применительно к открытым системам, к которым относятся и все водные объекты, закон сохранения количества движения (импульса) трансформируется в закон изменения количества движения (импульса), который означает, что изменение количества движения (импульса) открытой системы равно сумме всех внешних сил, действующих на эту систему.

Уравнение движения водного потока

$$\sum_{i=1}^M F_{2i} - \sum_{j=1}^P F_{1j} = dF = m \frac{dV}{dt} \quad (3.7)$$

F_{2i} и F_{1j} – силы, способствующие и препятствующие перемещению объема воды массой m со скоростью V .

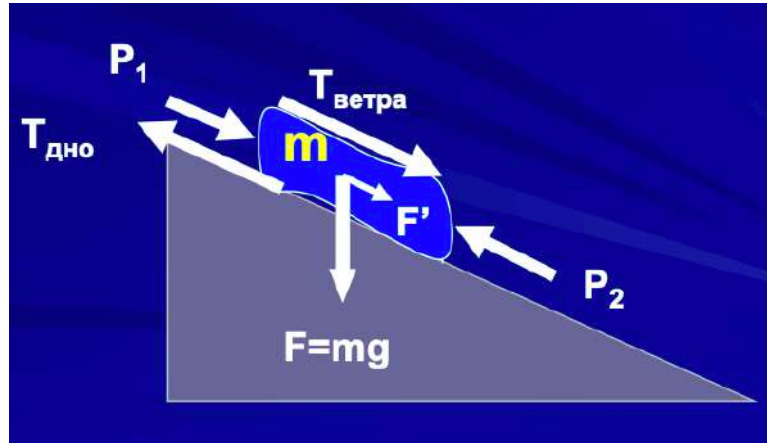


Рис. 3.5. Графическое изображение рассматриваемого случая.

К объемным (или массовым) силам, действующим на весь объем воды и приложенным к его геометрическому центру, относятся сила тяжести и ее продольная составляющая – центробежная сила и отклоняющаяся сила вращения Земли (сила Кориолиса).

Поверхностные силы, действующие на вертикальных гранях выделенного объема, подразделяются, в свою очередь, на нормальные, направленные перпендикулярно граням (это силы давления), и касательные, действующие вдоль граней (это силы трения). Различают силу трения у дна и силу трения, обусловленную действием ветра на водную поверхность.

Классификация видов движения в водных объектах по изменчивости

- По изменению скорости течения;
- По режиму движения воды;
- По состоянию потока.

Если мы рассматриваем водный объект и берем отдельно взятую внутри него точку, то скорость потока будет изменяться по всем трем направлениям (рис. 3.6).

**u – местная скорость -
 скорость в точке потока, м/с**

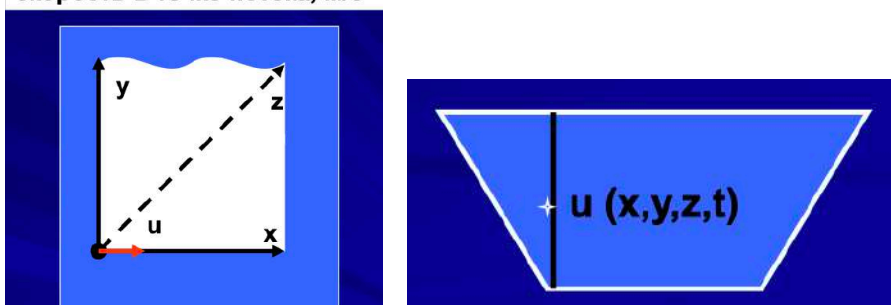


Рис. 3.6. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Средняя скорость потока находится следующим образом:

$$V = \frac{Q}{W} \text{ м/с,}$$

где Q – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), W – площадь поперечного сечения реки (м^2).

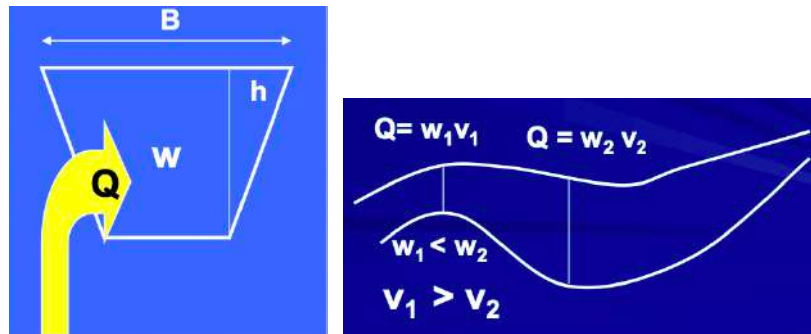


Рис. 3.7. Графическое изображение рассматриваемого случая.

На рис. 3.8 отображено, какой тип движений характерен в разных ситуациях.

Неустановившееся $dv/dt \neq 0$	Установившееся $dv/dt = 0$	
	Неравно- мерное $dv/dx \neq 0$	Равномер- ное $dv/dx = 0$

Рис. 3.8. Изменение скорости течения и виды движения воды.

Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы движения воды. Число Рейнольдса

Допустим есть некий резервуар, заполненный окрашенной жидкостью, которая подается по трубочке (рис. 3.9). Скорость течения жидкости определяется краном (чем больше кран открывается, тем больше скорость). В сосуде, из которого поступает жидкость в трубку, с помощью крана также поддерживается постоянный уровень. В процессе опыта меняется скорость подачи окрашенной жидкости.

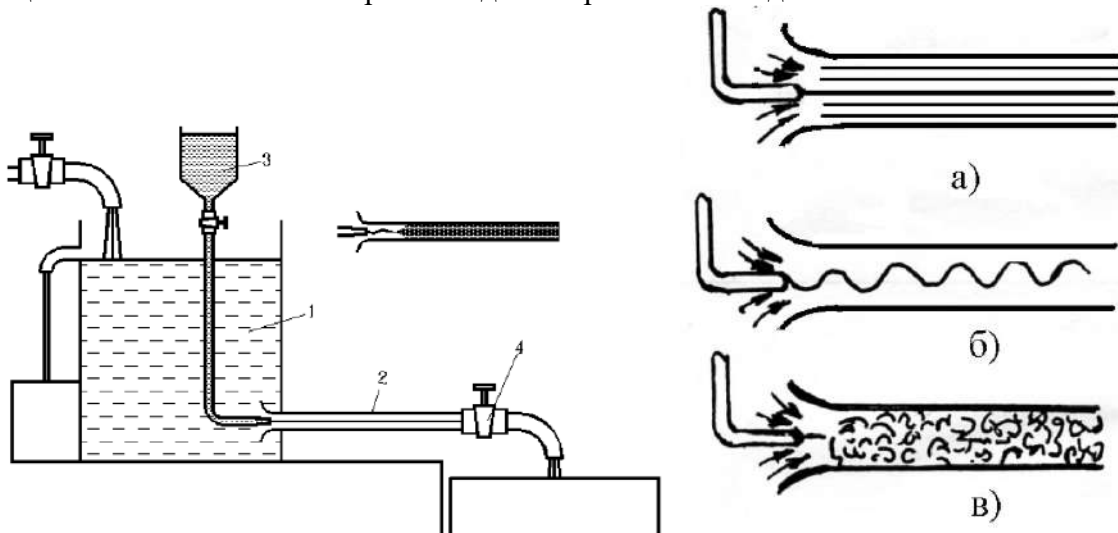


Рис. 3.9. Графическое изображение опыта Рейнольдса а) ламинарный режим; б) переходный режим; в) турбулентный режим.

Если скорость небольшая, то окрашенные струи жидкости не перемешиваются с бесцветной жидкостью большого сосуда (а). Если скорость подачи увеличивается, то окрашенные струйки принимают более сложную форму (б). При наибольшем напоре окрашенные струйки перемешиваются с окружающей жидкостью, и вся жидкость становится однородно окрашенной (в).

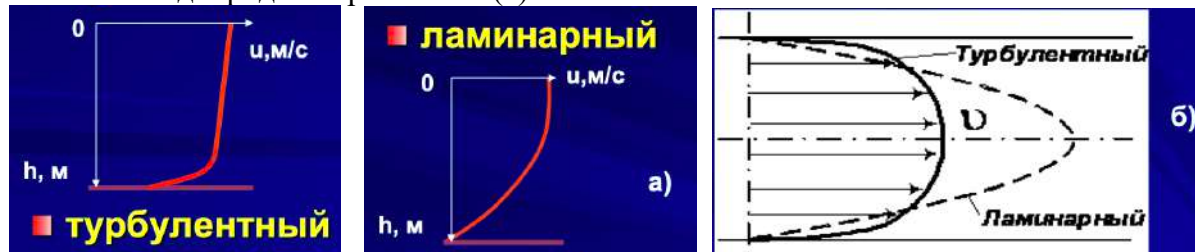


Рис. 3.10. Распределение местных скоростей потока U по глубине h (а) и ширине B (б). Струя воды попадает в поле тяжести, испытывая ускорение. Как только скорость течения возрастает настолько, что число Рейнольдса превышает критическое значение, ламинарное значение переходит в турбулентное.

Для того, чтобы отнести движение воды к одному из режимов, необходимо найти число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot h}{\nu}, \quad (3.8)$$

где V и h – скорость (м/с) и глубина (м) потока, ν – коэффициент кинематической вязкости (м²/с), $\nu = f(T)$

$Re > 3000$ – турбулентный режим

$Re < 300$ – ламинарный режим

$300 < Re < 3000$ – переходный режим

Типизация рек по состоянию водной поверхности. Число Фруда

- Спокойные;
- Бурные.

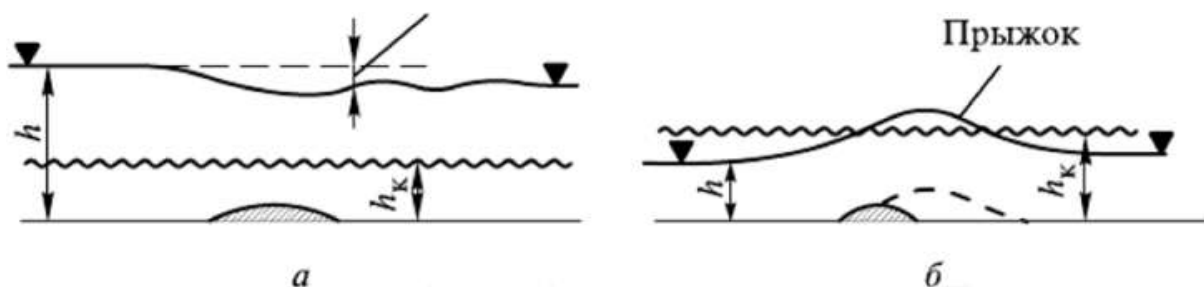


Рис. 3.11. Обтекание препятствия спокойным (а) и бурным (б) потоками.

Критерий подобия рек по состоянию потока – число Фруда:

$$Fr = \frac{V^2}{gh}, \quad (3.9)$$

где V и h – скорость потока (м/с) и глубина потока (м).

$Fr > 1$ – бурное состояние

$Fr < 1$ спокойное состояние

$Fr = 1$ критическое состояние

Лекция 4. Важнейшие процессы в гидросфере

Особенности процессов связано с тем, что 71% поверхности планеты занят именно водой (29% – сушей).

$$F_{\text{пов}} \text{ Земли} = 510 \text{ млн км}^2$$

По объектам гидросферы вода распределяется следующим образом: 96,40% принадлежит мировому океану, 1,86% – ледникам, 1,68% – подземным водам и 0,06 – другим водным объектам.

Современные исследования для определения запасов влаги в объектах. Спутники Grace

Последние годы (примерно с 2002 г.) аномалии силы тяжести измеряются спутниками GRACE. Смысл их работы заключается в том, что они, пролетая над некоторым участком Земли, меняют расстояние между собой (ускоряются или замедляются), в зависимости от изменения силы тяжести. Измеряя расстояние между спутниками, можно делать вывод об аномалии силы тяжести.



Рис. 4.1. Спутники GRACE.

Миссии по исследованию гравитационного поля:

- CHAMP – запущен GFZ в июле 2000 г. на орбиту высотой около 450 км. с целью изучения гравитационного и магнитного полей. Данные поступали 8 лет.
- GRACE – эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата, два спутника-близнеца, разработанные NASA/DLR, запущены с космодрома Плесецк 17 марта 2002. Спутники следуют один за другим на расстоянии ~220 км по околополярной орбите на высоте ~500 км, покрывая Землю за ~30 суток. Основными измеряемыми величинами являются расстояния между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных полетами ад притягивающими массами.
- GOCE – запущен в марте 2009 г. на орбиту высотой 260 км. Основная задача – получение высокоточной модели Гравитационного поля с помощью высокоточного градиентометра. Ожидаемая точность: 1 мГал, погрешность высот геоида 1-2 см при разрешении 100 км.

Задачи проекта GRACE:

- Уточнение параметров гравитационного поля;
- Построение гравитационных моделей Земли;

- Исследование геодинамических процессов;
- Изучение динамики уровня океана, влажности почвы, изменений уровня грунтовых вод, таяния ледников;
- Оценка водных ресурсов и их изменений для крупных речных бассейнов.

Общее уравнение баланса массы имеет следующее выражение:

$$\Delta TWS = \Delta SW + \Delta(P - E) + \Delta SN + \Delta TSS - \Delta R, \quad (4.1)$$

где ΔTWS – величина, измеренная с помощью GRACE; ΔSN – изменение запаса снежного покрова, ΔSW – изменение запаса воды в болотах и озерах, $\Delta(P - E)$ – изменение величины «осадки-испарение», ΔR – изменение стока реки.

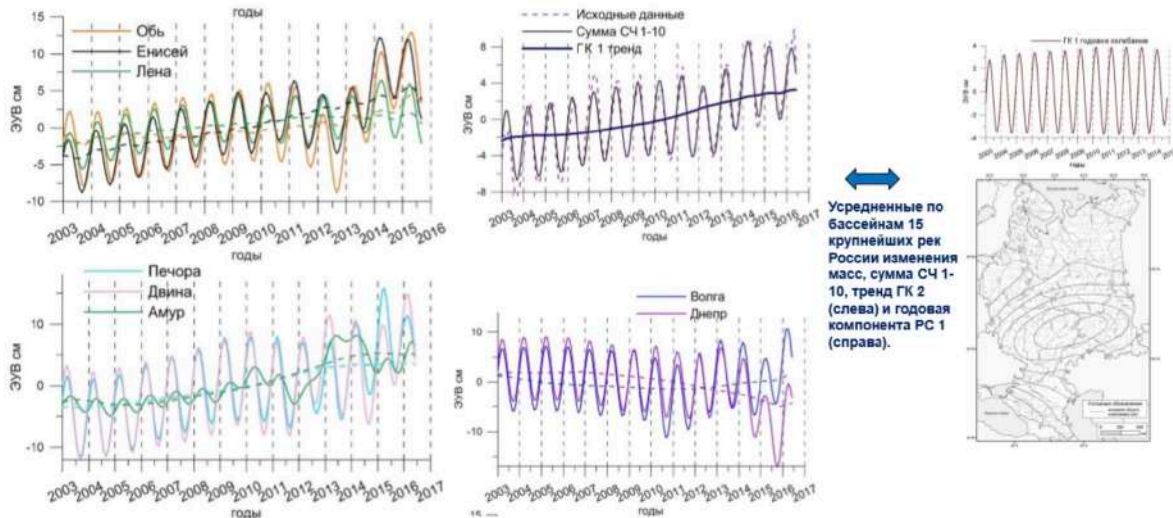


Рис. 4.2. Осредненные гравиметрические данные по аномалиям масс для бассейнов рек России (вверху справа – для 15 крупнейших рек). Сплошная линия — отфильтрованный МССА суммарный сигнал, пунктирная — тренд (Зотов, Фролова, Шум, 2016). Справа внизу - карта аномалий влагозапасов в речных бассейнах ЕТР в 2010 г. по данным GRACE (по отношению к среднему значению за 2003-2009 гг.) (точками показаны узлы сетки, для которых имеются данные GRACE).

Глобальные процессы перераспределения теплоты

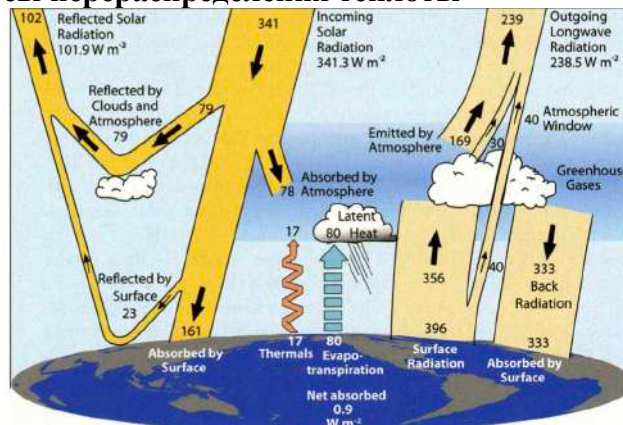


Рис. 4.3. Глобальный среднегодовой энергетический бюджет Земли за период с марта 2000 года по 1 мая 2004 года.

Солнечная энергия перераспределяется между поверхностью земли и атмосферой, между сушей и океаном. При этом природные воды выступают и как поглотитель и регулятор поступающей солнечной энергии, и как фактор ее перераспределения на Земле.



Рис. 4.4. Распределение поглощённой солнечной энергии.

Для поверхности Земли в целом величина радиационного баланса равна:

$$R_{\text{пов}} = \theta_{\text{исп}} + \theta_{\text{атм}} \quad (4.2)$$

На экваторе:

$$R_{\text{пов}} > \theta_{\text{исп}} + \theta_{\text{атм}} \quad (4.3)$$

На суше на испарение тратится 54% энергии радиационного баланса, на поверхности океана – более 90%. Океан, имея температуру поверхностного слоя в среднем более высокую, чем атмосфера (приблизительно на 3°C), играет важную роль в теплообмене и обогревает атмосферу. По расчетам В. Н. Степанова (1983), в океане содержится около $31.8 \cdot 10^{27}$ Дж теплоты – в 21 раз больше, чем в атмосфере.

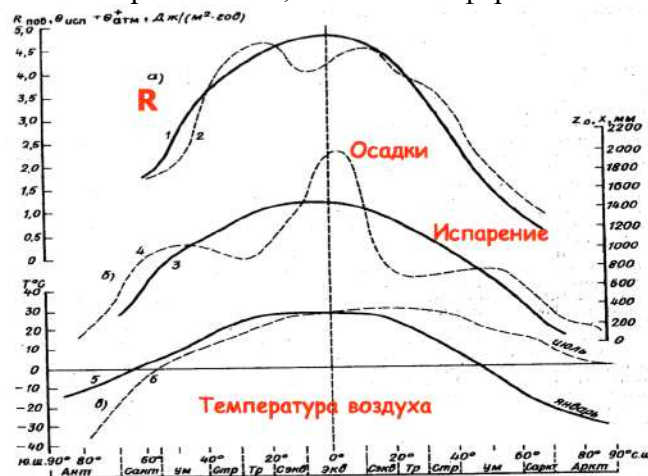


Рис. 4.5. Распределение радиационного баланса (1) и затрат теплоты на испарение и теплообмен с атмосферой (2) (а), испарения (3) и осадков (4) (б), температуры воздуха (5,6) (в).

С одной стороны водные объекты являются аккумуляторами тепла, а с другой – играют большую роль в перераспределении тепла на земном шаре. Перераспределение тепла приводит к круговороту воды.

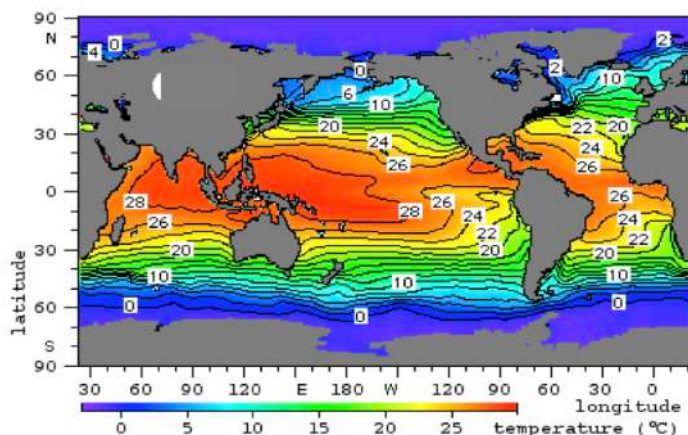


Рис. 4.6. Распределение поверхностной температуры Мирового океана.

Круговорот воды

Круговорот воды – механизм перераспределения на Земле вещества и энергии, объединяющий водные объекты и разные части планеты. Круговорот воды состоит из целого ряда процессов (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Процессы в гидросфере.

Круговорот воды на земном шаре – это:

- Форма реализации закона сохранения вещества на планетарном уровне;
- Условие существования биосферы;
- Фактор эрозии и седиментации;
- Движущая сила выветривания и переноса растворенных и взвешенных веществ, теплоты и т.п.;
- Механизм возобновления водных ресурсов.

К физическим причинам этого явления относятся неравномерное распределение солнечной энергии на поверхности планеты и сила тяжести.

Роли солнечной радиации в круговороте воды:

- Нагревание и испарение воды;
- Неравномерность нагревания, распределения давления, температуры воздуха испаряемости, осадков;
- Неравномерность прогрева воды и плотности воды, возникновение плотностных течений.

Роли силы тяжести:

- Выпадение атмосферных осадков;
- Движение поверхностных и подземных вод;
- Фильтрация вод.

К звеньям глобального круговорота относятся океаническое и материковое (рис. 4.8).

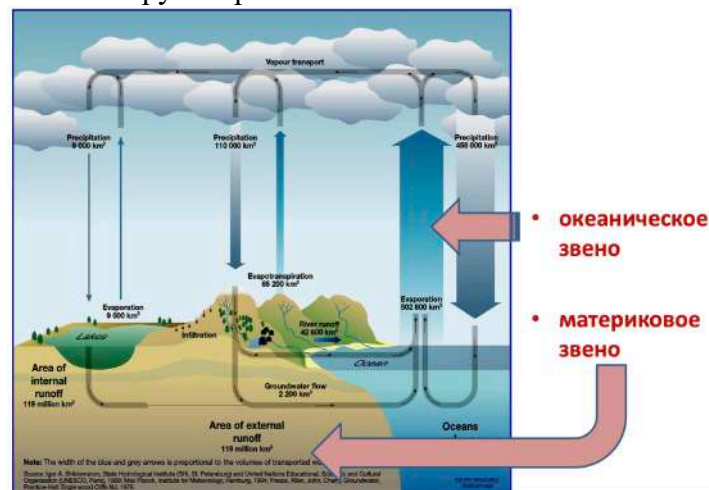


Рис. 4.8. Звенья глобального круговорота воды.

В океаническое звено вовлечено 458 тыс. км³ воды в год:

$$Z_{\text{ок}} = X_{\text{ок}} + r = 458 + 47 = 505(\text{тыс. км}^3) \quad (4.4)$$

Элементы:

- Испарение $Z_{\text{ок}}$
- Перенос влаги r
- Осадки $X_{\text{ок}}$
- Течения
- Испарение

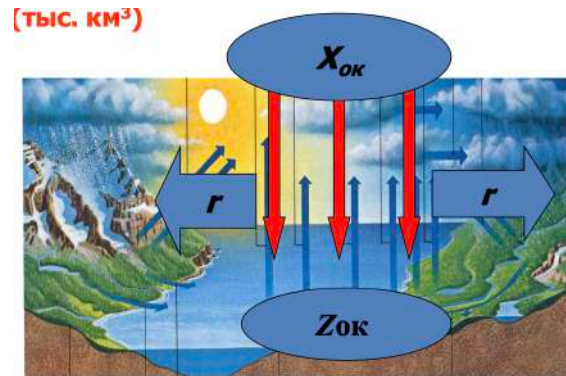


Рис. 4.9. Океаническое звено.

Схема внутриматерикового влагооборота

Элементы материкового круговорота:

- Испарение Z_c
- Перенос влаги r
- Осадки X_c
- Поверхностный ($Y_{\text{речн}}$ и $Y_{\text{ледн}}$) и подземный сток (W)

В материковом круговороте принимает участие 72 тыс. км³ /год:

$$X_c = Z_c + r \text{ (ур. водного баланса для суши)} = 72 + 47 = 119 \text{ (тыс. км}^3\text{)} \quad (4.5)$$

Водообмен суши и океана: 47 тыс. км³/год. Переносимая влага (r) возвращается в океан в виде материкового стока ($Y_c = r$):

$$Y_c = Y_{\text{речн}} + Y_{\text{ледн}} + W = 41,7 + 3,0 + 2,3 = 47 \text{ (тыс. км}^3\text{/год)} \quad (4.6)$$

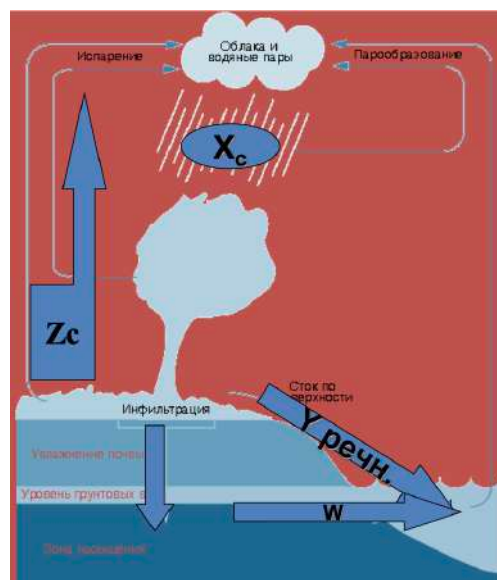


Рис. 4.10. Материковое звено.

Составим водный баланс для областей внешнего и внутреннего стока. Осадки для всей поверхности суши, областей внешнего и внутреннего стока:

$$X_c = X_{c'} + X_{c''} = 110 + 9 = 119 \text{ (тыс. км}^3 \text{/год)} \quad (4.7)$$

Испарение для всей поверхности суши, областей внешнего и внутреннего стока:

$$Z_c = Z_{c'} + Z_{c''} = 63 + 9 = 72 \text{ (тыс. км}^3 \text{/год)} \quad (4.8)$$

Уравнение водного баланса (закон сохранения вещества) для суши:

$$X_{c'} = Z_{c'} + Y_c \quad (110 = 63 + 47) \quad (4.9)$$

$$X_{c''} = Z_{c''} \quad (9 = 9) \quad (4.10)$$

Ледниковый сток: Гренландия и Антарктика содержат 99% пресного льда на поверхности земли. Талая вода от ледяных щитов способствует повышению уровня моря.

Тенденции ледяного покрова:

- Ежегодная общая потеря массы Гренландского ледяного покрова увеличилась в более чем два раза в последнем десятилетии 20 в. и возможно снова удвоилась к 2005 г.;
- Более теплое лето увеличивает таяние и расход льда;
- Относительно изменений массы льда в Антарктическом ледяном покрове за последнее время пока неясно, хотя, возможно, произошло снижение массы;
- Шельфовые ледники становятся тоньше, а некоторые тают.

В настоящее время уровень моря повышается на 3.1 мм в год, что в два раза выше темпа XX в. Повышение уровня моря от талых вод по прогнозам может ускориться вследствие увеличения таяния льда на суше.

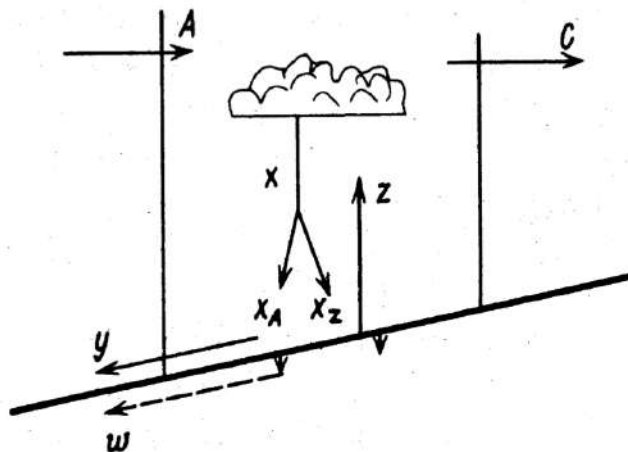


Рис. 4.11. Схема внутриматерикового влагооборота (X_A – внешние осадки, X_Z – внутренние осадки)

Характеристика внутриматерикового влагооборота – коэффициент влагооборота $K_{вл}$:

$$K_{вл} = \frac{X}{X_A} \quad (4.11)$$

Интенсивность внешнего водообмена

Водообмен – процесс обновления воды в элементе гидросферы. Бывает внешний (за счет поступления воды из внешних источников: осадки, сток) и внутренний (за счет

внутренних динамических процессов: конвекция и т. п.). Интенсивность внешнего водообмена высчитывается следующим образом:

$$K_B = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^P \Pi_i = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N P_j, \quad (4.12)$$

где K_B – коэффициент условного водообмена для объекта с объемом воды V , Π_i – приходные составляющие баланса воды, P_j – расходные составляющие баланса воды.

Физический смысл коэффициента внешнего водообмена:

- Характеризует, сколько раз в году сменяются воды в водном объекте ($K_B > 1$);
- Характеризует часть объема воды в этом элементе, которая обновляется за 1 год ($K_B < 1$).

Период условного водообмена (период условного возобновления вод):

$$\tau_B = \frac{1}{K_B}, \quad (4.13)$$

где τ_B – время (годы или доля года), за которое вода в элементе гидросферы полностью возобновляется. Период обновления воды в некоторых водных объектах (по данным ГГИ, 2008):

Водный объект	Объем воды, тыс. км ³	Период обновления, годы (дни)
Мировой океан	1 338 000	2650
Ледники	25 780	9700
Подземные воды	23 400	1400
Озера	176	17
Реки	2	(19)
Влага в атмосфере	13	(8)

Лекция 5. Водные ресурсы и их использование

Период обновления воды

На прошлой лекции мы изучали периоды обновления воды в разных водных объектах. Рассмотрим пример расчета для Онежского озера. Реки приносят до 74% приходной части водного баланса ($15,6 \text{ км}^3$ в год), 25% ($5,2 \text{ км}^3/\text{год}$) приходится на атмосферные осадки. 84% расходной части водного баланса приходится на сток из озера по реке Свирь (в среднем $17,6 \text{ км}^3$ в год), 16% - на испарение с водной поверхности ($3,2 \text{ км}^3/\text{год}$). Объем озера – 285 км^3 .

$$K_B = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^P \Pi_i - \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N P_j \quad (5.1)$$

Сумма приходных составляющих = сумма расходных составляющих = $20,8 \text{ км}^3/\text{год}$.

Коэффициент водообмена = $0,073$.

Период водообмена = $13,7$ лет.

Круговорот солей и минеральных частиц, круговорот газов

Рассмотрим круговорот солей, газов и наносов. Общее количество солей, растворенных в водах Мирового океана, равно $46,5 \cdot 10^{15}$ т. При объеме вод в океане 1338 млн. км^3 это дает среднюю соленость воды около 35‰ .

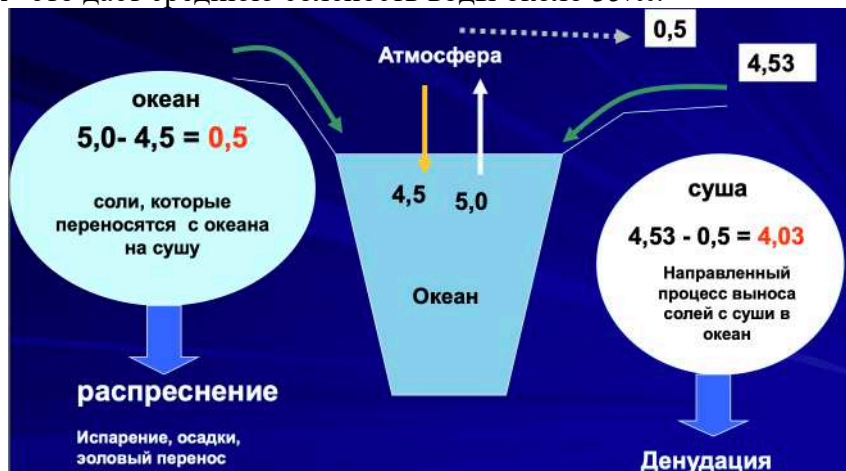


Рис. 5.1. Круговорот солей (млрд.т).

Следующий вид круговорота – круговорот наносов. Наносы – минеральные частицы, переносимые водой. В суммарном стоке наносов рек в среднем 90-95% приходится на взвешенные и 5-10% - на влекомые наносы. В Мировом океане постоянно находится приблизительно 1370 млрд т взвеси. Это наносы, поступающие с реками, но не успевшие еще осесть, продукты размыва берегов и взмучивания волнами грунтов дна в прибрежной зоне; частицы, приносимые ветром, взвеси органического происхождения. Сток наносов составляет $15,7$ млрд т/год.

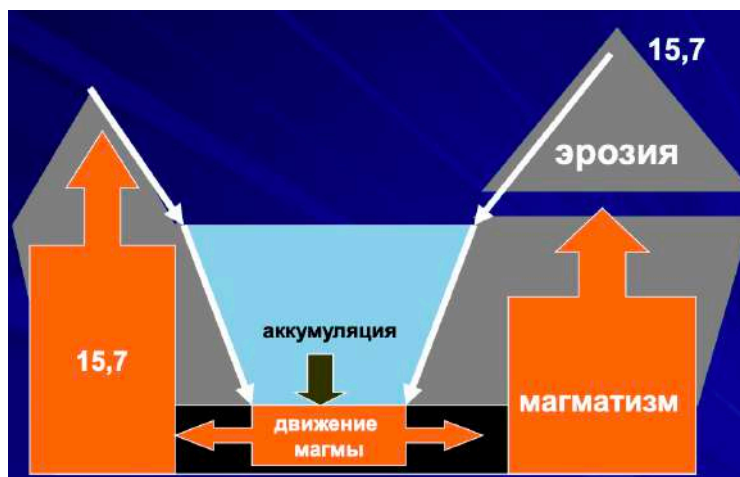


Рис. 5.2. Круговорот наносов (млрд.т/год).

Реки мира также приносят в океан около 15-22 млрд. т. наносов и 4,5 млрд. т. растворенных веществ.



Рис. 5.3. Сток наносов.

Прежде чем рассматривать круговорот газов, стоит обсудить химико-биологические процессы в гидросфере, приводящие к концентрации кислорода и углекислого газа:

- Из газов, участвующих в круговороте веществ в природе, наибольшее значение имеют кислород и диоксид углерода;
- Баланс этих газов в природных водах определяется соотношением процессов продуцирования кислорода (и поглощения диоксида углерода) при фотосинтезе, потребления кислорода (и выделения диоксида углерода) при окислении органического вещества, выдыхания организмов.

Фотосинтез – образование органического вещества и кислорода под влиянием солнечной радиации и хлорофилла в зеленых организмах.

- Выпадение осадков;
- Процессы эрозии и аккумуляции;
- Формирование животных и растительных тканей.

Экосистема – комплекс живых организмов (биоценозов) и среды их обитания, связанных потоками вещества и энергии. В зависимости от того, где живут гидробионты, выделяют следующие типы экосистем:

- Наземные;
- Пресноводные;
- Морские.



Рис. 5.6. Типы гидробионтов.

Планктон – взвешенные в воде организмы, не способные к самостоятельному перемещению. К видам планктона относятся фитопланктон (водоросли), зоопланктон (простейшие) и бактериопланктон (бактерии).



а

б

Рис. 5.7. Морской планктон (а), игольное ушко и размер планктона (б).

Нектон – гидробионты, способные к перемещению на большое расстояние (киты, тюлени, рыбы, моллюски).



Рис. 5.8. Нектоны.

Бентос – организмы, обитающие на дне.

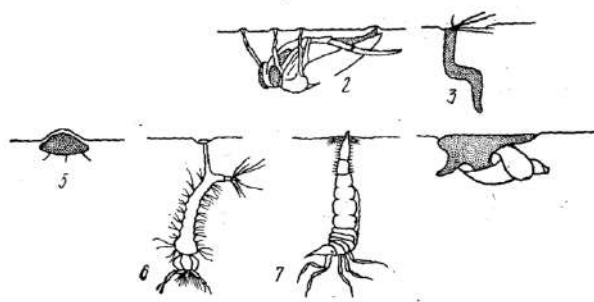


Рис. 5.9. Бентос (мидии, актинии).

Нейстон – организмы, прикрепляющиеся к поверхностной пленке воды.



а



б

Рис. 5.10. Эпинеuston, прикрепляющийся к пленке воды сверху (а), и гипонейстон, прикрепляющийся к пленке воды снизу (б).

По условиям питания гидробионты можно выделить две группы:

- Автотрофы (поглощают питательные вещества из воды или синтезируют их) – зеленые растения (другое название «продуценты»);
- Гетеротрофы (потребляют готовое органическое вещество) – рыбы и т. п (другое название «консументы»).

Показатели интенсивности биологических процессов в водных объектах:

- Биомасса – общее количество органического вещества в живых организмах в данном водном объекте и в данный момент времени (г, г/м³, г/м², кг/га);

- Продуктивность (продукция) – приращение биомассы за некоторый интервал времени t .

Биологическая продуктивность (БП) – интенсивность создания гидробионтами органического вещества ($\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$):

$$\text{БП} = r/t, \quad (5.2)$$

где r – биомасса, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с.

Фотосинтез – процесс создания органического вещества (первичной продукции) автотрофными гидробионтами. Гетеротрофные организмы используют или преобразуют это вещество.

Классификация водных объектов по условиям питания гидробионтов

1. Олиготрофные – питательных веществ (органики) мало, биологическая продуктивность мала;
2. Мезотрофные – средние условия питания;
3. Эвтрофные – органики и биогенных веществ много, бурное развитие фитопланктона; эвтрофирование – повышение биологической продуктивности водных объектов в результате природного или техногенного накопления в них биогенных элементов. Основные факторы, влияющие на процесс эвтрофирования в водоемах:
 - Наличие биогенных элементов;
 - Комфортная для фитопланктона температура воды;
 - Метеорологические условия;
 - Освещенность водной толщи.

Подобная проблема была остро стояла в XX в. – тогда поступление фосфора в мировую сеть из канализационных труб достигает 2,56 млн. т/год. К ним добавляется около 0,6 млн. т/год из рассредоточенных источников сельскохозяйственного производства. Вследствие чего речной сток этого элемента возрос не менее чем в 4 раза.

В процессе биологической очистки сточных вод изымается лишь около 30% фосфора. Эффективность очистки от азотных веществ значительно выше.

В более чем 80% исследованных водоемов первичное продуцирование лимитируется фосфором. Увеличение количества фосфора в водной экосистеме более опасно, чем избыток азота, поскольку в первом случае дестабилизация биоценоза происходит с большей амплитудой.

К началу XXI в. экологическое состояние нормализовалось. Достаточно быстро процессы восстановления шли в предальпийских водоемах Боденское, Женевское, Комо. На сегодняшний день содержание общего фосфора в воде Боденского озера не превышает 10, а озер Женевское и Комо – 30 мкг/л, тогда как на уровень 1980 г. оно составляло в этих озерах 80-90 мкг/л.

4. Дистрофные – много токсичных веществ и мало кислорода.

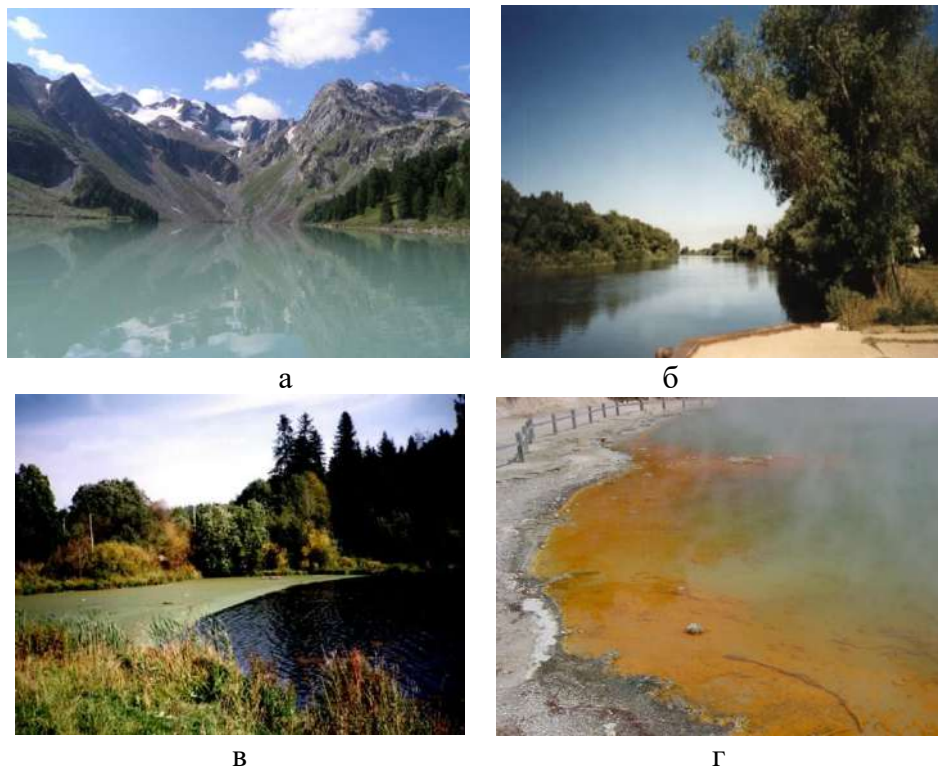


Рис. 5.11. Водные объекты: олиготрофные (а), мезотрофные (б), эвтрофные (в), дистрофные (г).

Водные ресурсы и их использование, классификация ресурсов пресных вод

Водные ресурсы (ВР) – особый тип природных ресурсов. В широком смысле – объем воды в различных объектах гидросферы, в узком – природные воды, которые используются или могут быть использованы в будущем. В самом узком смысле ВР – запасы пресных вод.

Классификация ресурсов пресных вод:

- Вековые (статические) – не подверженные заметным колебаниям часть водных объемов озер, ледников, подземных вод;

$$V = V_1 + V_2 \quad (5.3)$$

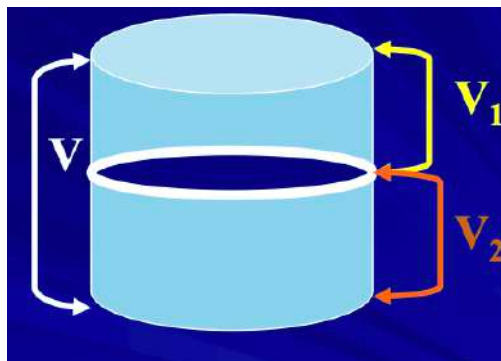


Рис. 5.12. Графическое изображение рассматриваемого случая.

- Возобновляемые – воды, которые ежегодно восстанавливаются в процессе круговорота воды на Земном шаре.



Рис. 5.13. Ресурсы речного стока и водообеспеченность России на фоне наиболее богатых водными ресурсами стран.

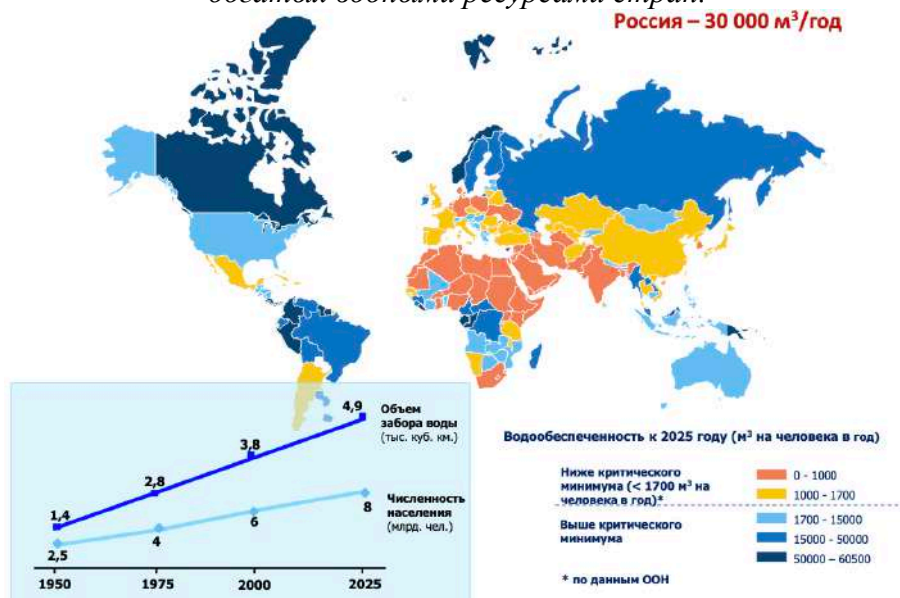


Рис. 5.14. Водообеспеченность различных стран и водопотребление.

Климатические изменения

Водный кодекс РФ: водное законодательство и изданные в соответствии с ним нормативные акты основываются на следующих принципах:

- Значимость водных объектов в качестве основы жизни и деятельности человека;
- Приоритет охраны водных объектов перед их использованием. Использование водных объектов не должно оказывать негативное воздействие на окружающую среду;
- Сохранение особо охраняемых водных объектов, ограничение или запрет использования которых устанавливается федеральными законами;

- Целевое использование водных объектов. Водные объекты могут использоваться для одной или нескольких целей;
- Приоритет использования водных объектов для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения перед иными целями их использования. Предоставление их в пользование для иных целей допускается только при наличии достаточных водных ресурсов;

Типизация видов использования водных ресурсов

- Водопользование. Водопотребители – отрасли, изымающие воду из рек, озер, подземных источников. Среди основных: промышленность, сельское хозяйство, тепловая энергетика, коммунальное хозяйство.
- Водопотребление. Водопользователи – отрасли хозяйства, использующие водные объекты. Среди основных: гидроэнергетика, водный транспорт, рыбное хозяйство, туризм и отдых.

Структура водопотребления

На рис. 5.15. показана структура мирового водопотребления с тремя составляющими: сельским хозяйством, коммунальным водоснабжением и промышленностью. Так, Азии принадлежит 57% мирового водозабора и 70% безвозвратного (например, испарения). Северной Америке – 15%, а Европе – 13%.

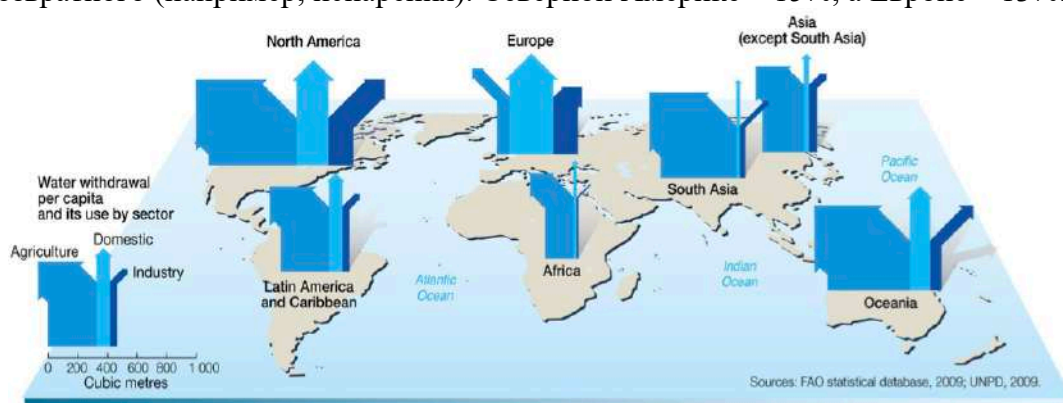


Рис. 5.15. Структура мирового водопотребления.

Годовое уменьшение водных ресурсов мира к началу 1990-х годов составило около 5%. Примерно 90% этой величины обусловлено использованием воды на сельскохозяйственные нужды, 5–7% теряется на испарение с поверхности водохранилищ и примерно в равной степени (в размере приблизительно 3%) влияют хозяйственно-бытовое и промышленное использование вод.



Рис. 5.16. Изменение забора воды, водопотребления безвозвратных потерь в отраслях мирового хозяйства

*Первая строка означает общее водопотребление, вторая – безвозвратное водопотребление

Страна	Площадь, млн. км²	Общее водопотребление (первая строка), безвозвратное водопотребление (вторая строка) (км³/год)				Общая площадь водохранилищ (км²)	Объем дополнительных потерь вследствие испарения поверхности водохранилищ (км³/год)
		Коммунальное водоснабжение	Промышленность	Сельское хозяйство	В целом		
Франция	0,55	7,00	22,7	8,00	37,7	550	0,15
		0,70	3,2	6,60	10,5		
Россия	17,1	15,6	48,8	16,6	81,0	57228	10,3
		3,5	6,4	14,3	24,2		
Швеция	0,45	1,10	1,9	0,3	3,31	613	0,055
		0,12	0,36	0,26	0,74		
Украина	0,6	3,6	9,9	5,5	19,0	9800	2,21
		0,9	2,1	5,0	8,00		
Канада	9,97	6,6	41,4	4,9	52,9	59700	5,37
		1,0	1,6	3,8	6,4		
США	9,36	59,0	221	210	490	39400	24,8
		8,6	12,9	122	144		
Египет	1,00	4,00	4,80	45,4	54,3	5720	12,4
		0,42	0,57	37,0	38,0		
Китай	9,6	57,5	90,6	433	581	30000	14,9
		5,7	13,5	282	301		
Индия	3,29	23,0	23,0	564	610	14500	15,1
		3,2	2,4	396	402		
Аргентина	2,78	3,8	7,5	26,6	37,9	4969	2,9
		0,45	0,9	20,2	21,6		
Бразилия	8,51	9,6	10,5	24,5	44,6	34310	13,9
		1,1	1,2	16,2	18,5		
Австралия	7,68	2,8	7,3	14,8	24,9	3362	2,72
		0,3	0,6	11,5	12,4		

Рис. 5.17. Общее и безвозвратное водопотребление по отдельным странам мира (по состоянию на 2000 г.)

Водопотребление в России:

- В России используется не более 2% речного стока. Более 63% потребляемой воды составляет пресная вода из поверхностных источников, из подземных источников используется менее 32%, и только 5% приходится на морскую воду.
- Всего за год забирается порядка 60–65 км³ свежей воды, из них больше половины поступает в промышленность, около 20% – на хозяйственно-питьевые нужды, сельское хозяйство потребляет около 13%, прочие – примерно 6%.

К причинам роста водопотребления во второй половине XX относятся:

- Рост численности населения;

- Увеличение площади орошаемых земель;
 - Быстрое развитие промышленности.
- Причины падения водопотребления:
- Сокращение роста орошаемых площадей;
 - Водосберегающие технологии.

По данным ГГИ (рис. 5.18), современное водопотребление составляет 2790 км³/год с очень большими вариациями по регионам и континентам.

$$K_{\text{исп ВР}} = \frac{W_{\text{водопотребления}}}{\text{ВР}} \quad (5.4)$$

Для общей оценки состояния использования водных ресурсов в том или ином регионе использовано два критерия: коэффициент использования водных ресурсов, который определяется соотношением величин полного водопотребления, и удельная водообеспеченность региона (количество пресной воды (за вычетом безвозвратного потребления), которое приходится на одного жителя).

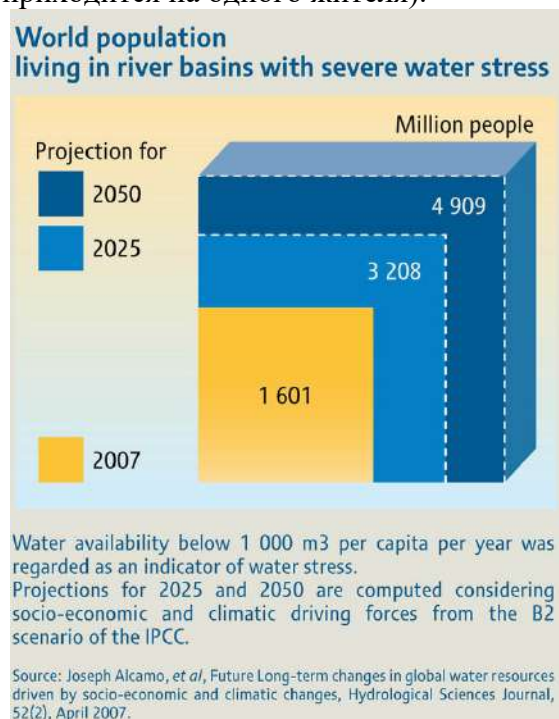


Рис. 5.18. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Современная ситуация характеризуется:

- Увеличением антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы, истощение их ресурсов и ухудшение их экологического состояния;
- Повышенная экстремальность характеристик речного стока в последние десятилетия и увеличение ущерба от опасных гидрологических явлений.

Пути уменьшения дефицита воды

1. Увеличение располагаемых для использования водных ресурсов за счет:

- Многолетнего и сезонного регулирования стока рек;
 - Использования вековых запасов пресных вод;
 - Искусственного увеличения осадков;
 - Территориального перераспределения водных ресурсов.
2. Уменьшение темпов развития основных водопотребителей и использование более современных технологий для сокращения потребления пресной воды в промышленности, сельском и коммунальном хозяйстве.

Сопоставление экономик разных стран по водоемкости ВВП (Данилов-Данильян, 2006): в 2000 г. удельная водоемкость экономики в м³/год на 1 доллар ВВП составляла:

- В России: 0,3 м³/год;
- В Швеции: 0,012 м³/год;
- В Великобритании: 0,007 м³/год;
- В Беларуси: 0,22 м³/год.

Относительно уровня 1990 г., удельная водоемкость России выросла в два раза, Швеции – осталась на том же уровне, а Великобритании – уменьшилась в два раза (ни одна из этих стран не относится к вододефицитным регионам).

Гидрология ледников

Местонахождение воды в твердом агрегатном состоянии:

- Атмосфера (снег, иней, град, гололед);
- Поверхность суши: многолетние (ледники, наледи, снежники); сезонные (снежный покров, наледи);
- Под землей (подземные льды);
- На воде: многолетние (паковые льды, айсберги); сезонные (морские льды, озерные и речные льды).

Изменчивость состояния твердой фазы воды может быть:

- Многолетней;
- Сезонной;
- Текущей.

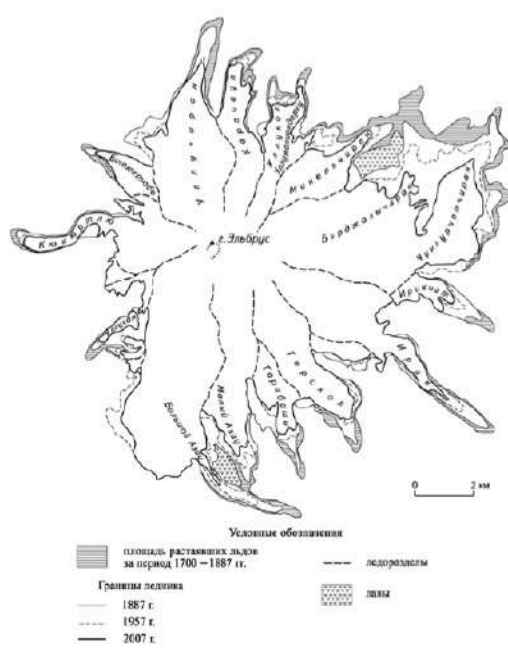


Рис. 5.19. Изменение Эльбруса с конца XVII в.

К формам существования твердой фазы воды в атмосфере относятся снег, иней, град и гололед.

К плавающим формам твердой фазы воды – паковые льды, айсберги, морской лед, озерный лед, речной лед.

Формы существования твердой фазы на поверхности суши: ледники. Снежники, наледи, снежный покров.

Лекция 6. Гидрология ледников

Формы существования твердой воды

На прошлой лекции мы выяснили, что форм существования твердой воды несколько. В этой лекции мы подробно рассмотрим несколько из них: ледники и наледы. Благодаря наличию вечной мерзлоты и суровым климатическим условиям, происходит образование мощного ледяного покрова (толщина льда может достигать более 1 метра). Сток рек, формируемый выше по течению, встречает этот ледяной покров и, не в силах найти выхода, изливается наружу (пробивает путь, образуя бугры пучения). Образуются либо русловые наледы, либо наледы, связанные с подземными источниками.

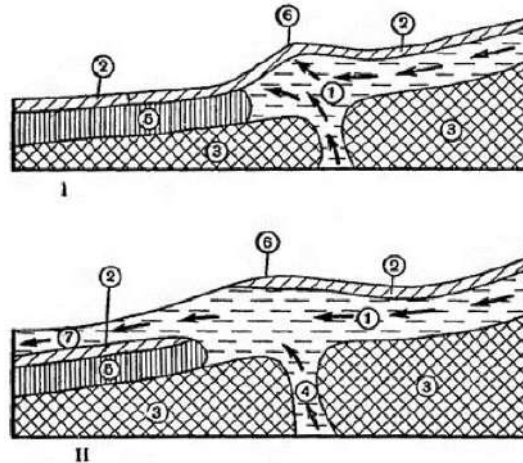


Рис. 6.1. Процесс формирования наледей. I – начальная стадия образования наледей; II – вторая стадия образования наледей. 1, 4 – вода; 2 – слой льда; 3 – многолетнемерзлая порода; 5 – вода, промерзшая до дна; 6 – наледный бугор;

Перед тем, как обсуждать структуру и форму ледников, следует определить значение климатической снеговой линии. Ледник возникает в условиях обилия осадков, отрицательных температур, наличия форм рельефа с отметками выше расположения КСЛ.

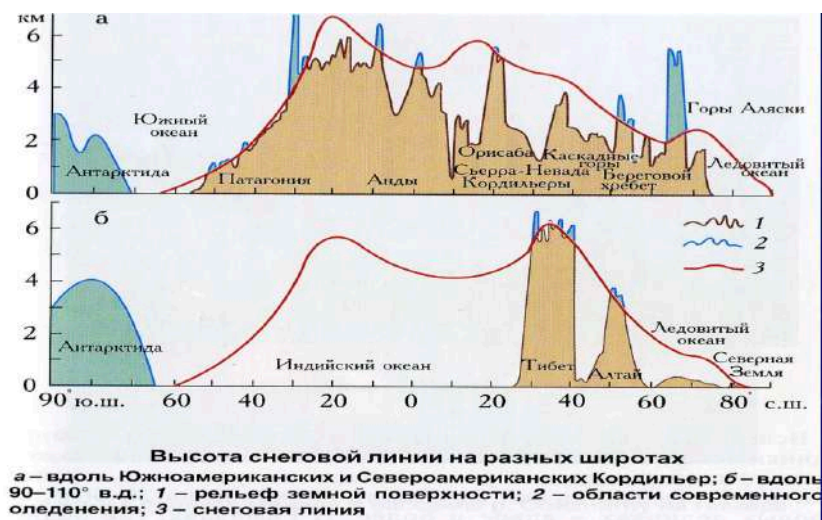


Рис. 6.2. Положение климатической снеговой линии (3) в различных регионах планеты (2 – области современного оледенения).

Факторы изменения климатической снеговой линии.

- Сумма осадков;
- Сумма отрицательных температур;
- Высота местности.

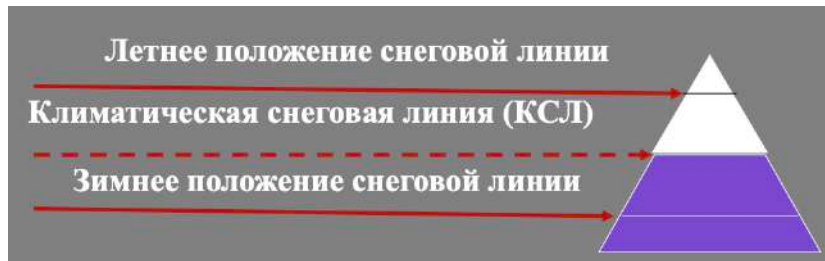


Рис. 6.3. Сезонная эволюция ледников.

Хионосфера – высотная зона выше расположения КСЛ, где $dm > 0$.

Ледники

Ледник – масса фирна и льда, образовавшаяся путем длительного накопления и преобразования твердых атмосферных осадков, и обладающая собственным движением; форма накопления и преобразования воды в твердом агрегатном состоянии на поверхности суши.

- Объединение ледников приводит к оледенению;
- Эволюция ледников характеризует длительные тенденции изменения в гидросфере.

Площадь современного оледенения составляет 16,25 млн км² (19,9% площади суши). Антарктида и Гренландия – 9,4 и 1,2%.

Классификация ледников

Ледники бывают покровные и горные. Покровные ледники (Антарктика, Гренландия, арктические острова) классифицируются на:

- Ледниковые купола (выпуклые ледники мощностью до 1000 м);



Рис. 6.4. Ледниковые купола.

- Ледниковые щиты (выпуклая форма, толщина льда составляет более 1000 м, площадь – больше 50 000 км²);



Рис. 6.5. Ледниковые щиты.

- Выводные ледники (быстро движутся, поступают в моря);



Рис. 6.6. Выводные ледники.

- Шельфовые ледники (продолжение наземных ледниковых покровов. Плавают или опираются на дно, причина образования крупный айсбергов).

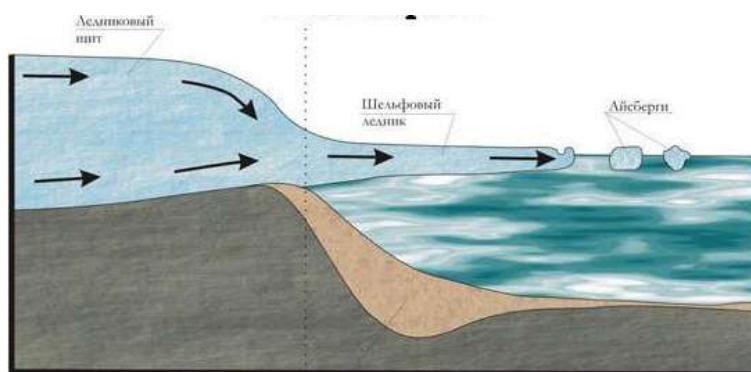


Рис. 6.7. Образование шельфового ледника и айсбергов.

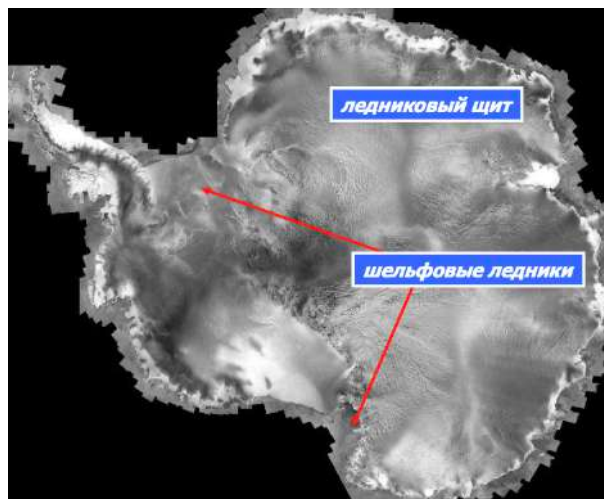


Рис. 6.8. Оледенение Антарктиды.

Покровное оледенение в России в тыс. км²:

- Новая Земля – 23,64;

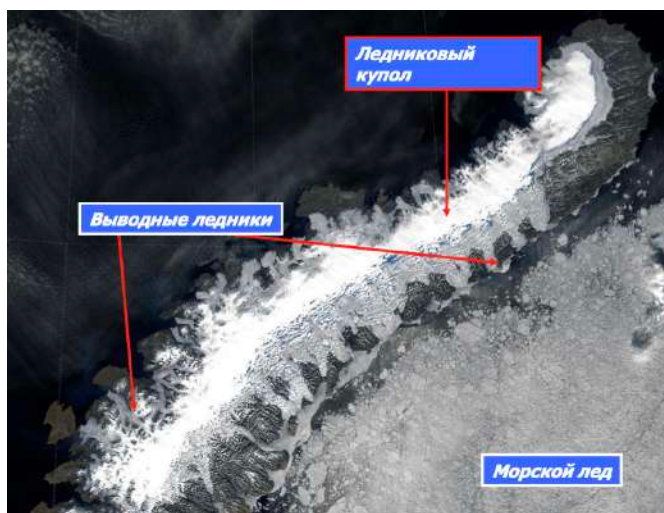


Рис. 6.9. Новая Земля (остров Северный).

- Северная Земля – 18, 32;
- Земля Франца-Иосифа – 13,75.

Горные ледники классифицируются на:

- Ледники вершин (занимают вершины отдельных гор, кальдеры вулканов);



Рис. 6.10. Ледник вершин.

- Ледники склонов (занимают депрессии склонов: впадины, кары);



Рис. 6.11. Ледник склонов.

- Долинные ледники (занимают верхнюю и среднюю часть горных долин).



Рис. 6.12. Долинный ледник.

Ледник Беринга – самый крупный горный ледник в мире. Расположен в горах Чугач на Аляске (Северная Америка). Длина ледника от самого удаленного истока составляет 203 км, площадь — около 5800 км². На леднике берут начало несколько рек. Назван в честь русского путешественника Витуса Беринга.



Рис. 6.13. Ледник Беринга.

Изменение площади оледенения

Изменение площади оледенения (млн км²):

- Современные условия: 17;
- Последняя ледниковая эпоха: 34;
- Максимум четвертичного оледенения: 54.

Каждый ледник можно условно разделить на две области: область питания, где происходит аккумуляция массы, и область абляции (область расхода этой массы).



Рис. 6.14. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Соотношение площади области питания $F_{\text{п}}$ и абляции $F_{\text{а}}$ определяется ледовым коэффициентом:

$$k_{\text{л}} = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{а}}}, \quad k_{\text{л}} = 0,5 - 2,0 \quad (6.1)$$

В современных условиях долинные ледники Альп, Кавказа, Скандинавии имеют $k_{\text{л}}$ от 1 до 2. У каровых ледников этот коэффициент меньше (0,5-1).

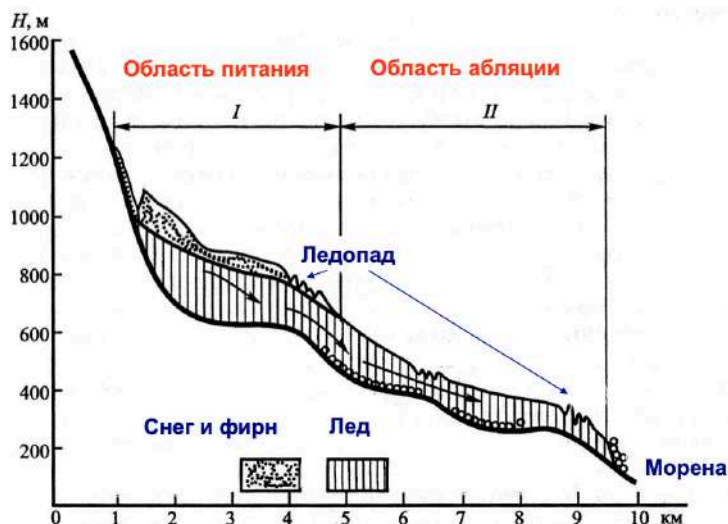


Рис. 6.15. Структура долинного ледника.

Источники питания ледников

Источники питания (П):

- Водяной пар;
- Дождь;
- Снег;
- Метелевой перенос;
- Лавины.



Рис. 6.16. Относительная роль (%) различных источников питания
Процессы в нижней части толщи ледника:

- Пластические деформации льда;

- Экзарация;
- Таяние.



Рис. 6.17. Поверхностная абляция.

Процессы в нижней области абляции:

- Таяние льда;
- Движение обломочного материала;
- Аккумуляция минеральных частиц (морены).

Факторы уменьшения объема ледников (P):

- Таяние льда;
- Испарение льда;
- Сдувание снега;
- Образование айсбергов.

Уравнение баланса массы ледника

$$P - \Pi = dM = -dm \quad (6.2)$$

$dM > 0,$	$dm < 0,$	m – уменьшается
$dM < 0,$	$dm > 0,$	m – возрастает
$dM = 0,$	$dm = 0,$	m – не меняется

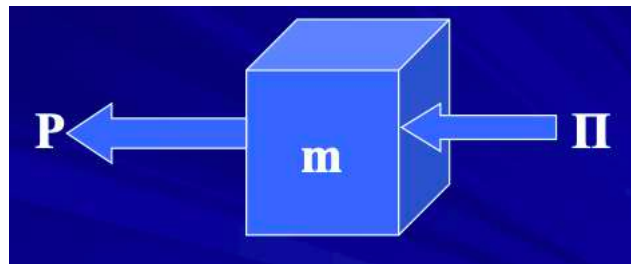


Рис. 6.18. Графическое изображение рассматриваемого случая.

dM – разность между расходом льда P и его образованием Π , dm – изменение массы ледника.

Баланс льда в характерных областях ледников:

- В области питания: $dm > 0$;
- В области абляции: $dm < 0$;
- На границе областей: $dm = 0$;



Рис. 6.19. Графическое изображение рассматриваемого случая.

По прогнозам экспертов, к концу столетия при благоприятном или неблагоприятном сценариях исчезнет в среднем либо 18%, либо 36% ледников. При этом горные ледники в Центральной Европе, Восточной Африке, Азии, тропических районах Анд при неблагоприятном сценарии сократятся на 80%.

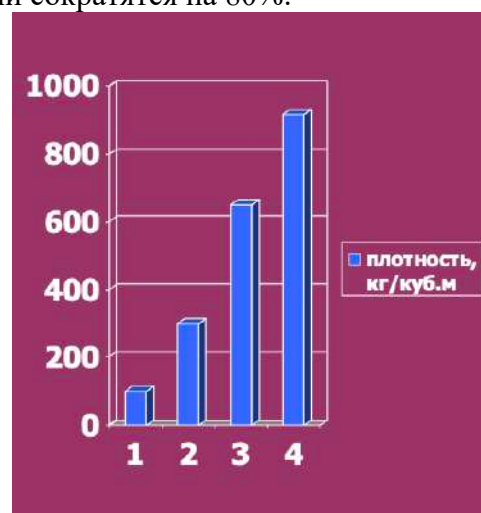


Рис. 6.20. Трансформация снега в области питания ледников: снег (1), зернистый снег (2), фирн/зернистый лед (3), глетчерный лед (4).

Процессы кристаллизации и трансформации снега

Большую роль при кристаллизации играет сублимация – переход парообразной влаги в твердую:

- $t^{\circ}\text{C}$ на поверхности снега $< t^{\circ}\text{C}$ у почвы;
- Упругость водяного пара в нижних слоях больше;
- Водяной пар перемещается вверх;
- Нижняя часть разрыхляется вследствие испарения – образуется глубинный иней;
- На поверхности образуется снежная доска.

В Антарктиде наоборот:

- $t^{\circ}\text{C}$ на поверхности снега $> t^{\circ}\text{C}$ у льда;
- Упругость водяного пара в нижних слоях меньше;
- Водяной пар перемещается вниз;
- Верхняя часть разрыхляется вследствие испарения – образуется глубинный иней;
- На поверхности образуется снежная доска.

Процессы трансформации снега:

- Аккумуляция снега;
- Уплотнение;
- Рекристаллизация;
- Режелация (повторное замерзание талой воды в толще снега и льда);
- Конжелация (повторное замерзание талой воды на поверхности льда);
- Инфильтрация воды.

Эволюция ледников, режим и движение

Многолетняя эволюция ледников:

- $dm > 0$: масса и площадь ледника увеличивается;
- $dm < 0$: масса и площадь ледника уменьшается.

Факторы интенсивности движения ледников:

- Превышение критической массы льда;
- Уклон поверхности скольжения;

- Повышенная температура воздуха и льда;
- Наличие слоя воды в основании ледника.

Движение ледников связано с пластичностью льда. Механизм движения – деформация и растяжение, возможно нарушение сплошности льда.



Рис. 6.21. Деформация льда.

Отличия в движении ледников:

- Движение начинается при толщине льда 15-30 м;
- Мощные ледники движутся быстрее;
- Чем больше уклон поверхности, тем больше скорость ледника;
- При наступании ледника его скорость больше, при отступании – меньше;
- Летом и днем скорость ледника больше.

Скорость движения ледника (ламинарные потоки):

$$V = kh^2I_{\text{л}}, \quad (6.3)$$

где h – толщина льда, $I_{\text{л}}$ – уклон поверхности, $k = 0,014$.

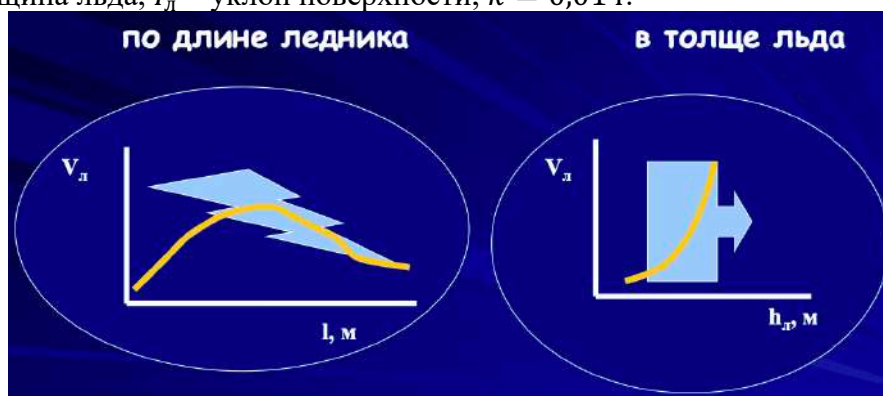


Рис. 6.22. Изменение скорости движения ледников.

Типизация ледников по скорости движения:

- $V_{л} < 100 - 200$ м/год: горные ледники, ледниковые щиты;
- $V_{л} < 10 - 20$ м/год: выводные ледники;
- $V_{л} < 100 - 200$ м/год: пульсирующие ледники.

При рассмотрении положительной роли ледников, мы в первую очередь говорим о их регулирующем воздействии.

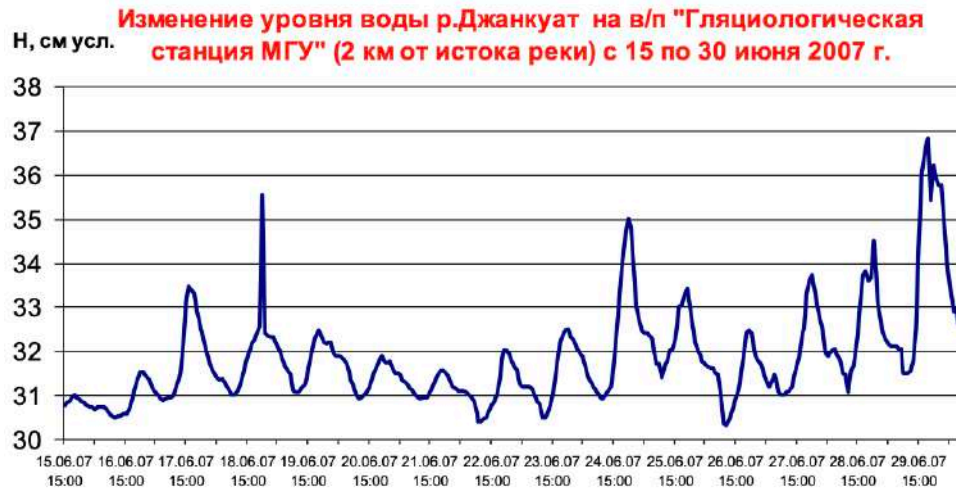


Рис. 6.23. Регулирующая роль ледников.

Гидрологическое и хозяйственное значение ледников:

- Источник питания рек (1% мирового стока);
- Фактор регулирования водного режима;
- Опреснение и охлаждение океана;
- Опасные процессы.



Рис. 6.24. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Уменьшение ледников ведет к нестабильному образованию ледяных и обломочных дамб, что приводит к росту наводнений, ледниковым лавинам.

Гидрология подземных вод

Подземные воды – совокупность воды (в различном агрегатном состоянии) в земной коре. Находятся во взаимодействии с атмосферой и поверхностными водами, участвуют в круговороте воды.

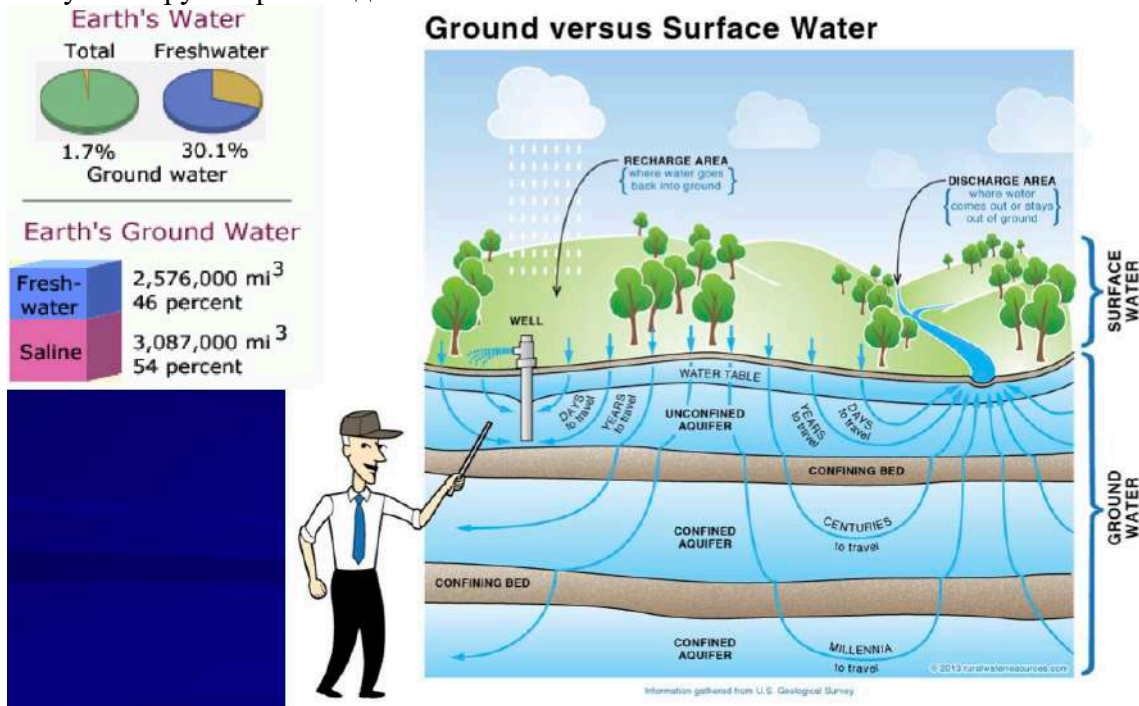


Рис. 6.25. Подземные воды.

Происхождение подземных вод:

1. Экзогенное (их источник – водные объекты на поверхности суши и влага атмосферы);

Бывают:

- Инфильтрационные: инфильтрация атмосферных осадков, речных, озерных, морских вод, поступление влаги через поры и трещины;

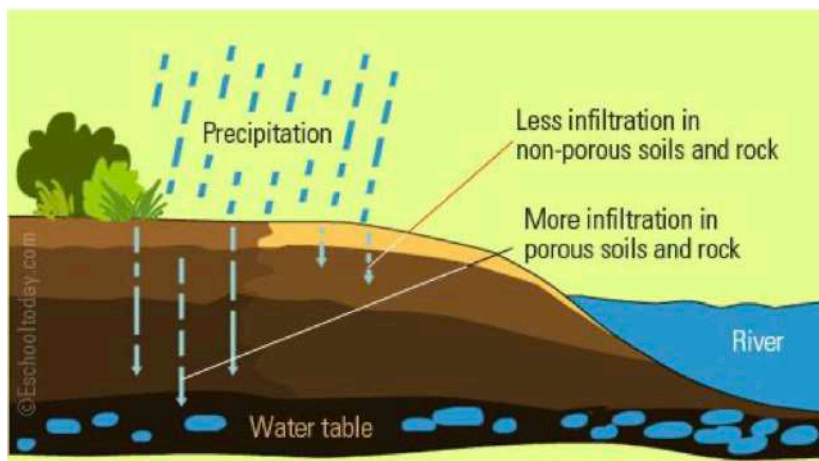


Рис. 6.26. Инfiltrация.

- Конденсационные: конденсация водяного пара в порах почвы, доминирует в условиях пустынь;
- Седиментационные: образуются из вод того водного объекта, где происходил процесс седиментации, «иловые растворы»;

2. Эндогенное (их источник – недра Земли).

- Дегидратационные: формируются вследствие дегидратации минералов;
- «Ювенильные»: воды в зонах современного вулканизма (поступают из магматических очагов).

Ювенильная теория объясняет образование подземных вод в процессе зонного плавления вещества Земли за счет летучих компонентов базальтовой (наиболее легкоплавкой) магмы, содержащей воду и в молекулярном, и в диссоциированном виде.

Полагают, что ювенильными водами сформирована практически вся водная оболочка Земли, хотя средняя (в геологическом времени) интенсивность этого процесса относительно невелика – порядка $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$, что в 3-4 раза меньше современного потребления Москвы на коммунальные и технические нужды.

Важно, что этот процесс приводит к новообразованию воды – в отличие от всех вышеназванных, в которых происходит лишь перераспределение воды в пределах гидросферы.

Физические свойства грунтов

Горные породы, как коллектор, содержащий подземные воды, обладают двумя «фундаментальными» водно-физическими свойствами:

- Емкостью (способны вмещать определенное количество воды);

- Проницаемостью (способность пропускать двигающуюся воду).

Характеристики:

- Плотность;

$$p_r = \frac{m_r}{V_r}, \quad (6.4)$$

где m_r – масса грунта, кг; V_r – объем грунта, м³. Плотность будет меняться в зависимости от минералогического состава:

Минеральный состав грунта	Плотность, кг/м ³
Песок	2650
Супесь	2700
Суглинок	2710
Глина	2740

- Сквозность (пористость и трещиноватость);

$$p = \left(\frac{V_{п}}{V_r} \right) * 100\%, \quad (6.5)$$

где $V_{п}$ – объем пор, p – коэффициент пористости.

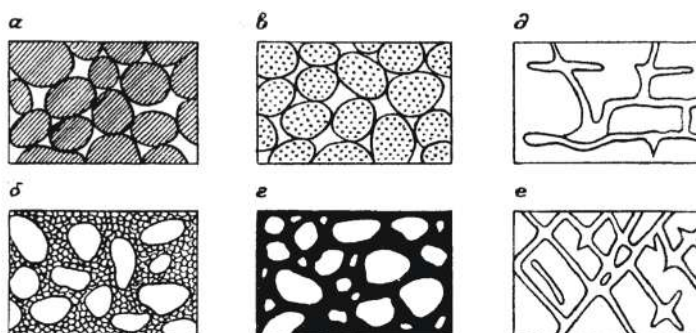


Рис. 6.27. Виды пористости.

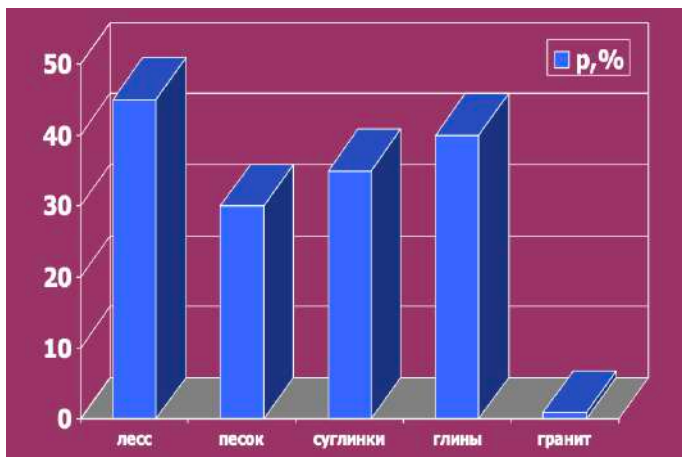


Рис. 6.28. Изменение коэффициента пористости.

Виды воды в порах грунтов:

- Связанная;
- Капиллярная;
- Гравитационная (свободная);
- Лед;
- Водяной пар.

Связанная вода: может быть химически связана (входит в состав минералов, выделяется при высокой (примерно 200°C) температуре) и физически связана (удерживается на поверхности частиц молекулярными силами.)



Рис. 6.29. Схема расположения молекул в пределах диффузионного слоя твердой частицы.

Физически связанная вода может быть гигроскопической (прочносвязанной) и пленочной (рыхлосвязанной).

Гигроскопическая вода:

- Сорбируется частицами грунта;
- Удерживается молекулярными силами;
- Толщина слоя не более диаметра 1-20 молекул;
- Испаряется при температуре 90-120°C.

Помимо этого, она образует моно- или полимолекулярную пленку на поверхности частиц минерального скелета, имеет низкую растворяющую способность, плотность до 1,5 г/см³; аномальные вязкость, теплоемкость, электропроводность; замерзает при температурах ниже -10-80°C, не передает гидростатического давления и не передвигается под действием гравитации.

Пленочная вода:

- Пленка под гигроскопической водой;
- Может перемещаться.

Кроме того, она образует пленку в области двойного электрического слоя; замерзает при небольших отрицательных температурах, способна к постепенному выравниванию толщины «соседних» пленок.

Содержание пленочной воды в породах различно, причем в глинистых породах оно больше, чем в песчаных, а в мелкозернистых больше, чем в крупнозернистых.

- Влажность;
- Влагоемкость.

Лекция 7. Гидрология подземных вод

Подземная гидросфера

Капиллярная вода:

- Заполняет поры грунта;
- Перемещается под влиянием капиллярных сил;
- Определяет влажность грунта;
- Используется растениями;
- Входит в состав гидросферы.



Рис. 7.1. Соотношение типов грунта и высоты капиллярного поднятия $h_{п}$.

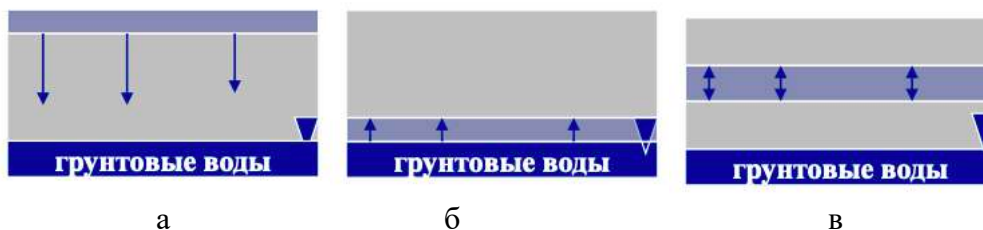


Рис. 7.2. Виды капиллярной воды: капиллярно-подвешенная (а), капиллярно-поднятая (б), капиллярно-разобценная (в).

Когда часть пространства уже занята гигроскопической, пленочной, капиллярной водами, но остается некоторое пространство, оно может заполняться гравитационной водой. Гравитационная вода:

- Перемещается под действием силы тяжести в порах и трещинах;
- Входит в состав подземных вод.

Свободная вода способна передвигаться под действием силы тяжести, ее количество в горной породе зависит от размера пор и трещин. В глинистых породах, где поры очень мелкие и обычно заполнены связанной водой, количество свободной воды невелико. Преобладает она в основном в крупнообломочных и трещиноватых породах.

В грунтах присутствует вода не только в жидких состояниях:



Рис. 7.3. Подземные льды.

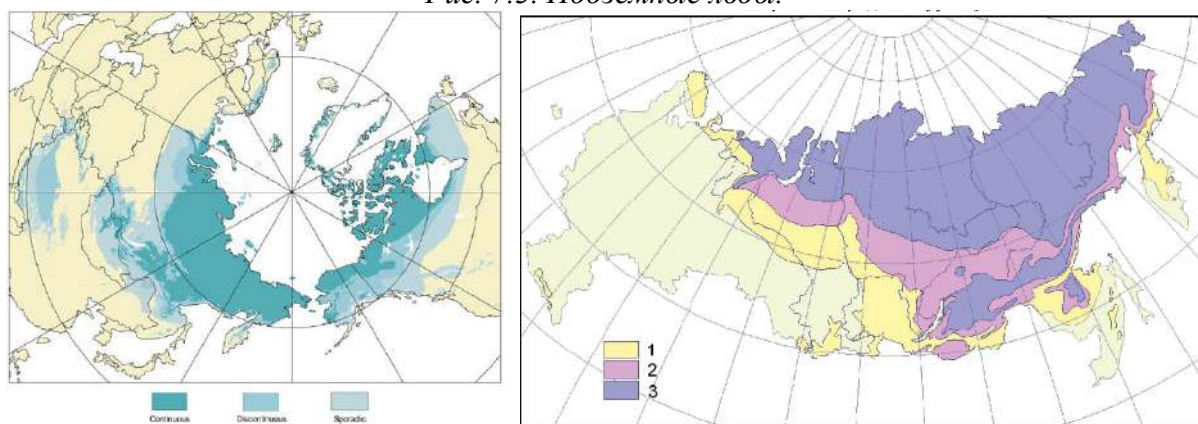


Рис. 7.4. Зоны островного (1) прерывистого (2) и сплошного (3) распространения вечной мерзлоты на территории суши северного полушария и России.

Водяной пар:

- Заполняет поры при отсутствии в них воды;
- Перемещается под влиянием градиента давления воздуха;
- Входит в состав гидросферы.

Водные свойства грунтов:

- Влажность (W) – содержание воды в грунте (%)

$$W = \frac{100m_B}{m_C} = \frac{100(m_T - m_C)}{m_C}, \quad (7.1)$$

где m_T – масса грунта и воды, m_C – масса высушенного грунта, m_B – масса воды в грунте.

- Влагоемкость (%) – способность грунта вмещать и удерживать воду.

Полная влагоемкость ($W_{ПВ}$) – максимально возможная влажность грунта.

Наименьшая влагемкость ($W_{нв}$) – количество гигроскопической, пленочной и капиллярной влаги, остающейся в грунте после окончания свободного стекания воды (для песков: 3-5%, супесей: 10-12%, суглинков: 12-22%).

Дефицит влажности (размерность d выражается в %):

$$d = W_{пв} - W \quad (7.2)$$

Второе фундаментальное свойство почвы грунтов – водопроницаемость (способность пропускать воду под действием силы тяжести или гидростатического давления). Зависит от размера и формы частиц грунта. Характеристика водопроницаемости – коэффициент фильтрации.

Коэффициент фильтрации характеризует водопроницаемость грунтов. Он зависит от количества и размера пор и от свойств фильтрующейся жидкости. Коэффициент фильтрации численно равен скорости фильтрации при гидравлическом уклоне, равном 1, т.е. когда вода фильтруется через грунт вертикально вниз.

Тип грунта	Коэффициент фильтрации м/сутки	Степень водопроницаемости
Гравий, галька	$> 10^2$	Высокая
Песок	$10^{-1} - 10^2$	Хорошая
Суглинки	$10^{-6} - 10^{-1}$	Слабая
Глина, скальные породы	$< 10^{-6}$	Непроницаемые, водоупоры

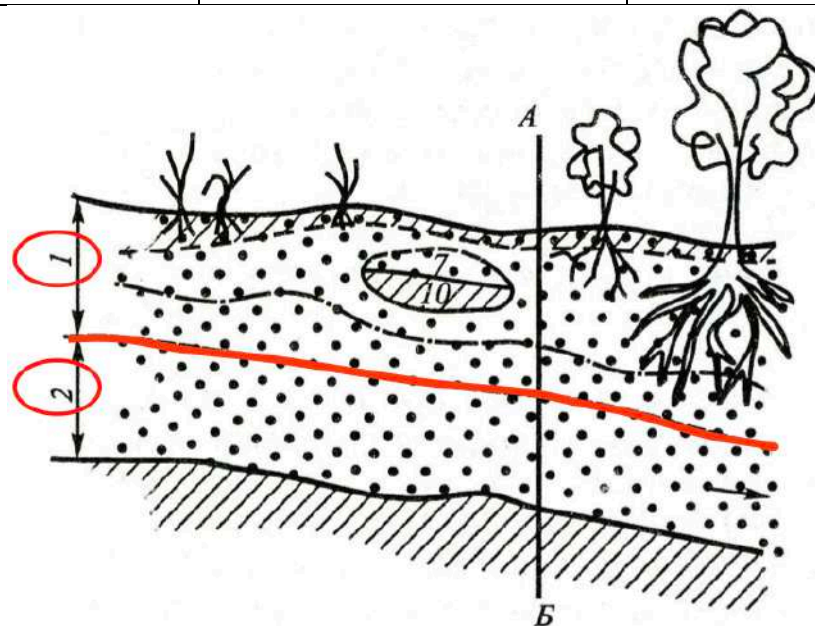


Рис. 7.5. Классификация подземных вод по характеру их залегания: подземные воды зоны аэрации (1), подземные воды зоны насыщения (2).

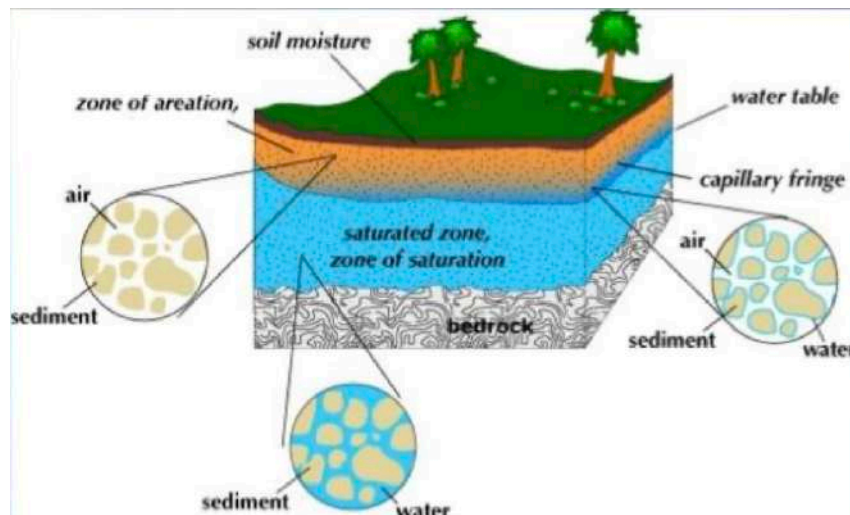


Рис. 7.6. Воды зоны аэрации и зоны насыщения.

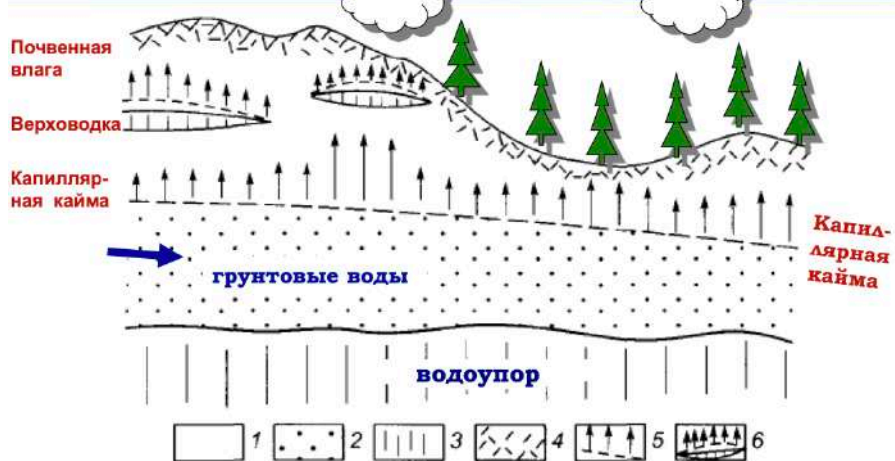


Схема залегания типов подземных вод зоны аэрации:
 1 — породы зоны аэрации, 2 — грунтового водоносного горизонта, 3 — слабопроницаемые породы, 4 — почвенный слой, 5 — уровень грунтовых вод и капиллярная кайма, 6 — верховодка

Рис. 7.7. Подземные воды в зоне аэрации.

Характеристика почвенных вод

- Формируются в верхнем (1,0-1,5 м) слое почвы;
- Временное скопление воды;
- Не образуют непрерывного водоносного горизонта;
- Возникают при сильных дождях и снеготаянии;
- Используются растениями.

Характеристика верховодки:

- Формируется при наличии слабопроницаемых грунтов;
- Временные, сезонные накопления воды;

- Мощность слоя воды: 0,4-1,0 м.

Капиллярная кайма:

- Формируется за счет подъема грунтовых вод по капиллярам;
- Участвуют в формировании почвенных вод;
- Источник воды для растений.

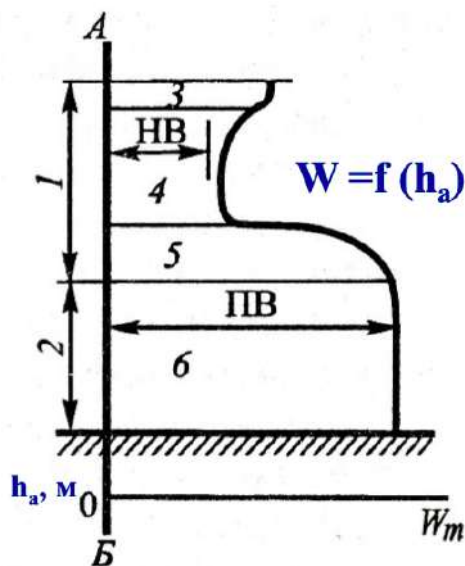


Рис. 7.8. Изменение влажности в пределах зоны аэрации (1), насыщения (2), почвенные подвешенные воды (3), инфильтрирующиеся воды зоны аэрации (4), капиллярные воды (5), грунтовые воды (6). НВ – наименьшая влагоемкость, ПВ – полная влагоемкость.

Воды зоны насыщения бывают безнапорные (грунтовые) и напорные (артезианские).

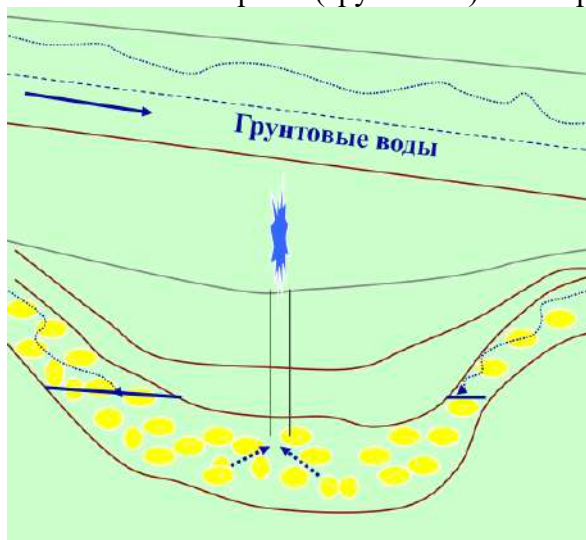


Рис. 7.9. Воды зоны насыщения.

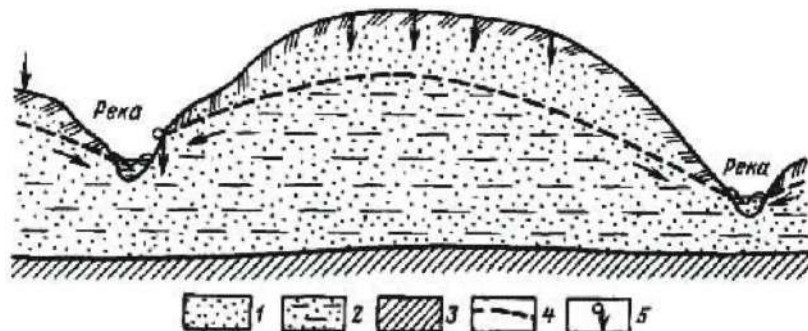


Рис. 7.10. Фора зеркала грунтовых вод: песок (1), песок водоносный (2), глина (3), кривая депрессии (4), родник нисходящий (5).

За основную характеристику грунтовых вод принята глубина их залегания от земной поверхности. Глубина определяет их роль в природе, отражает климатические и геолого-морфологические условия их формирования, процессы выщелачивания подвижных компонентов из пород, испарительного концентрирования, генезис и динамику грунтовых вод.

Артезианские воды – напорные воды (2), залегающие между водоупорными пластами (1) (рис.7.11).

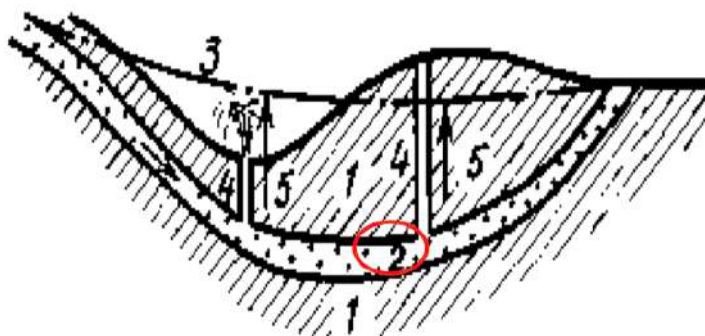


Рис. 7.11. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Характеристики артезианских вод:

- Залегают ниже грунтовых вод
- Поднимают вверх под влиянием пьезометрического напора;
- Имеют более стабильный режим;
- Меньше подвержены загрязнению;
- Источник питьевой воды.

Движение подземных вод

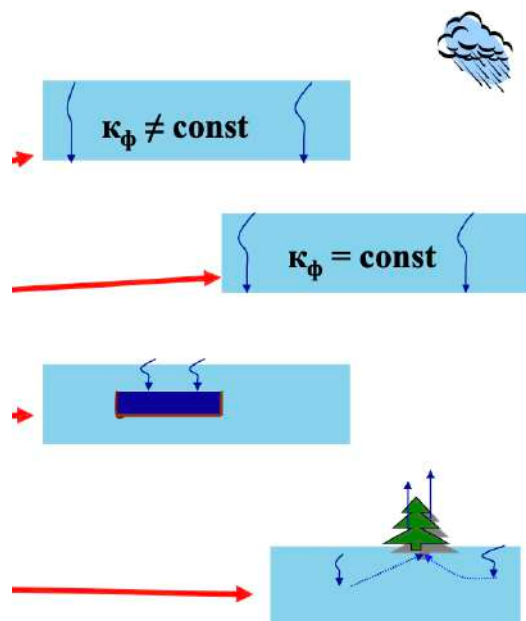


Рис. 7.12. Процессы в зоне аэрации: (сверху вниз) просачивание, инфильтрация, накопление подземных вод, десукция.

Кривая инфильтрации (рис. 7.13): I – свободное просачивание. Движение воды в грунте вертикально вниз происходит под действием силы тяжести и капиллярных сил в виде изолированных струек по капиллярным порам и отдельным каналцам; при этом пористое пространство грунта остается не насыщенным водой, и в нем сохраняется движение атмосферного воздуха. II – нормальная инфильтрация. Движение воды происходит сплошным потоком под действием силы тяжести, гидростатического давления и капиллярных сил; поры заполнены водой полностью. $v_{инф}$ – скорость инфильтрации.

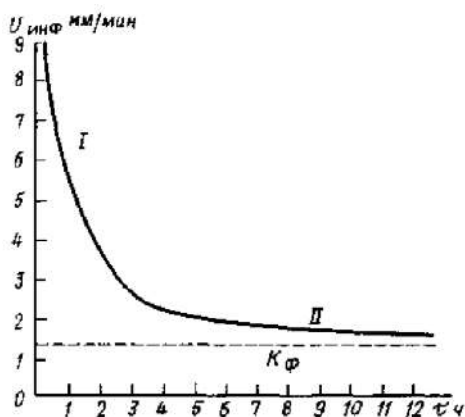


Рис. 7.13. Кривая инфильтрации.

Виды движения воды в зоне насыщения: фильтрация – перемещение в сторону уклона водоупора или в сторону уменьшения пьезометрического напора.

Закон фильтрации Дарси

$$V_{\phi} = k_{\phi} I, \quad (7.3)$$

где k_f – коэффициент фильтрации (м/сут), I – уклон водоупора или зеркала грунтовых вод (безразмерная величина), V_f – скорость фильтрации (м/сут).

Характеристика процесса фильтрации:

- Движение ламинарное;
- Скорость процесса зависит от типа грунта, изменяется от 10^{-6} до 10^2 м/сутки;
- Различают свободное и напорное просачивание, инфильтрацию (зона аэрации) и фильтрацию (зона насыщения) подземных вод.

Типы водного режима зоны аэрации (Ин – инфильтрация, Ис – испарение, Д – десукция):

- Промывной: $Ин > Ис + Д$;
- Компенсированный: $Ин = Ис + Д$;
- Испарительный: $Ин < Ис + Д$.



Рис. 7.14. Уравнение баланса подземных вод.

Режим грунтовых вод:

- Пространственно-временные изменения уровня воды, температуры и минерализации;
- Зависит от климатических факторов;
- Изменяется под влиянием поверхностных вод;
- Зависит от специфики геологических условий.

Особенности термического режима:

- Результат колебаний температуры воздуха и просачивающихся вод;
- С глубиной колебания температуры грунтовых вод быстро затухают;

- Зона с постоянной температурой воды расположена на глубине несколько метров;
- Наиболее глубоко (до 41 м) она расположена в районах континентального климата.

Гидрохимический режим грунтовых вод:

- Зависит от типа водного режима;
- Связан с разбавляющей способностью поверхностных вод, интенсивностью испарения;
- Имеет сезонный характер;
- Закономерно изменяется по широте.

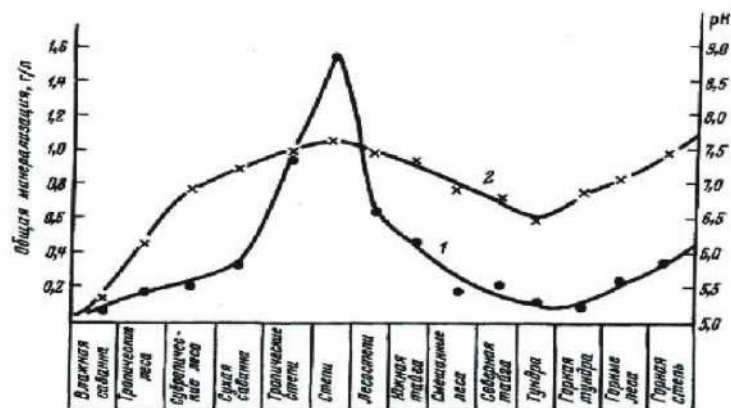


Рис. 7.15. Зональное изменение общей минерализации и pH грунтовых вод.

Взаимодействие поверхностных и подземных вод

Типы взаимодействия: постоянная гидравлическая связь, временная гидравлическая связь, отсутствие взаимодействия.

Постоянная гидравлическая связь бывает:

- Односторонняя (низкое положение водоупора и уровня грунтовых вод, река постоянно подпитывает подземные воды);

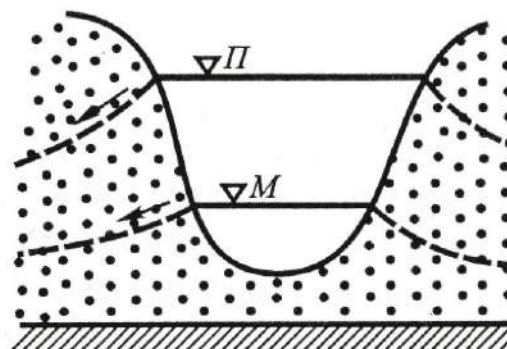


Рис. 7.16. Постоянная односторонняя гидравлическая связь. Характерно для карстовых районов, горных рек аридной зоны.

- Двусторонняя (река питает грунтовые воды в половодье, в реку поступают грунтовые воды в межень).

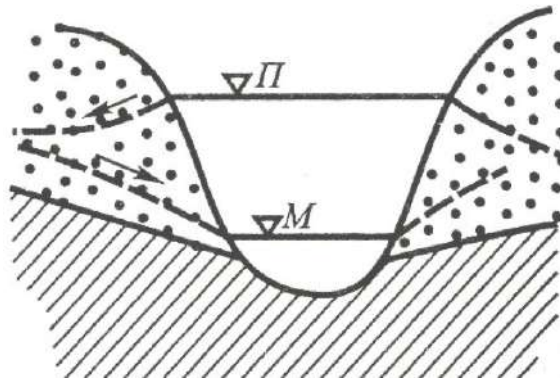


Рис. 7.17. Постоянная двусторонняя гидравлическая связь.

Временное взаимодействие поверхностных и грунтовых вод: при разрыве гидравлической связи на склонах появляются мочажины, родники.

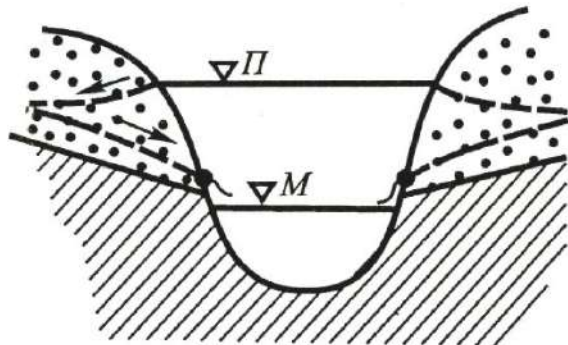


Рис. 7.18. Временное взаимодействие поверхностных и грунтовых вод.

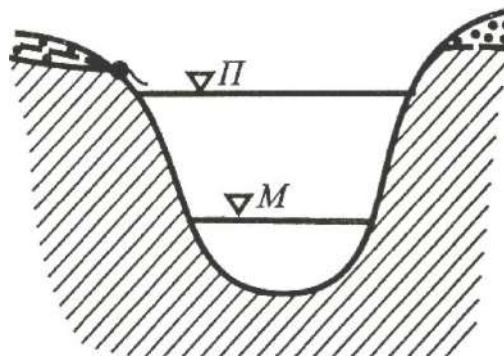


Рис. 7.19. Отсутствие гидравлического взаимодействия поверхностных и подземных вод.

Роль подземных вод:

- Формируют в среднем 30% стока воды в руслах рек;
- В межень могут формировать до 100% стока воды;

- Отличаются хорошим качеством и часто используются в водоснабжении;
- Провоцируют опасные процессы (карст, оползни и т.п.).

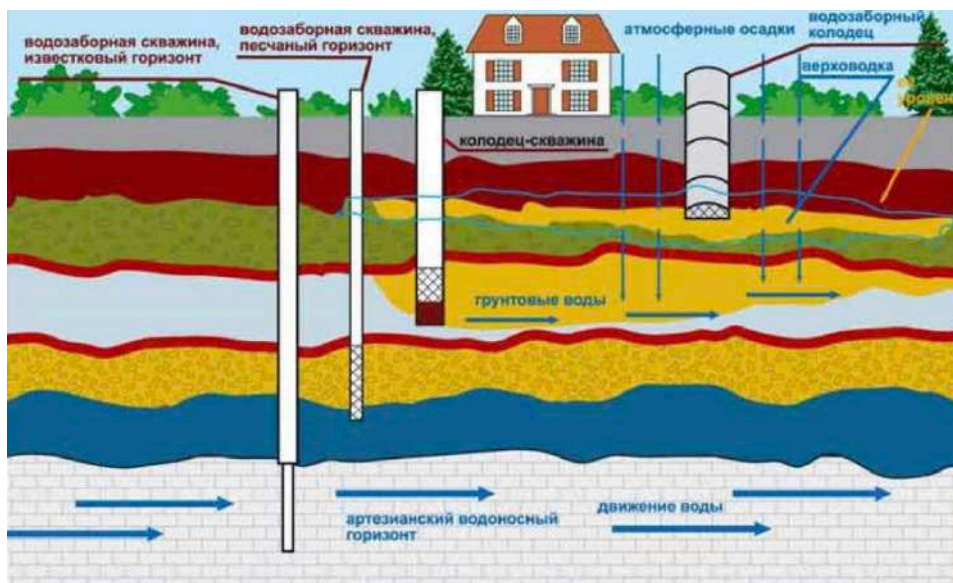


Рис. 7.20. Особенности использования подземных вод.

Великая рукотворная река (the Great Manmade River) – огромная подземная сеть водоводов, ежедневно поставляющая 6,5 млн м³ питьевой воды в день в населенные пункты пустынных районов и побережья Ливии. Функционирование рукотворной реки основано на заборе воды из 4-х огромных водных резервуаров, находящихся в оазисах Namada, Kufra, Morzuk и Sirt и содержащих приблизительно 35 000 км³ артезианской воды.



Рис. 7.21. Великая рукотворная река.

До введения в строй водопровода, стоимость покупаемой Ливией обессоленной морской воды составляла 3,75 доллара за тонну. Строительство собственной системы водоснабжения позволило Ливии полностью отказаться от импорта. При этом сумма всех затрат на добычу и транспортировку 1 м³ воды обходилась ливийскому государству (до войны) в 35 американских центов, что было в 11 раз меньше, чем раньше.

Опасные процессы, связанные с подземными водами:

- Оползень – отделившаяся масса рыхлых пород, медленно и постепенно или скачками оползающая по наклонной плоскости отрыва, при это часто сохраняя свою связанность, монолитность и не опрокидывая при этом свой грунт.

- Суффозия – вымывание частиц грунта за счет подземных вод

Реки и их типы

Река – относительно крупный водоток, питающийся атмосферными осадками со своего водосбора и имеющий четко выраженное сформированное самим потоком русло. Площадь бассейна – больше 50 км².

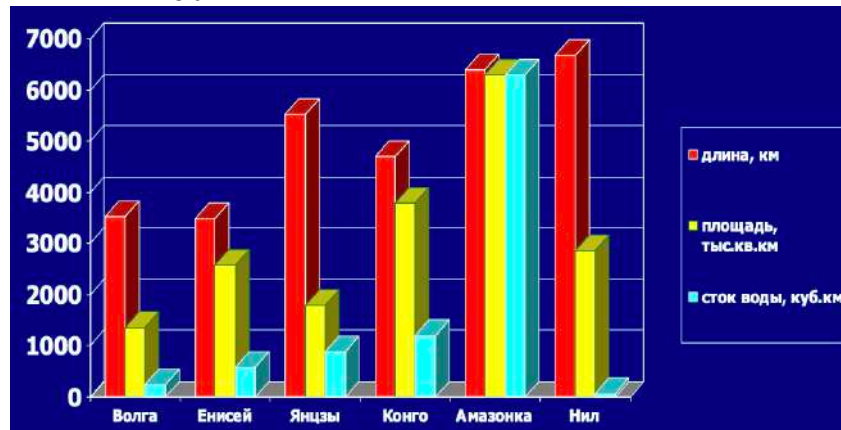


Рис. 7.22. Размеры некоторых рек мира.

Классификация рек по площади водосбора (км²):

Большие	$F > 50\,000$
Средние	$2\,000 < F < 50\,000$
Малые	$50 < F < 2\,000$
Ручьи	$F < 50$

Особенности больших рек:

- Бассейн реки расположен в нескольких природных зонах;
- Гидрологический режим таких рек полизонален.

Особенности средних рек:

- Бассейн расположен в одной природной зоне;
- Гидрологический режим рек имеет зональные черты.

Особенности малых рек:

- Бассейн занимает небольшую часть природной зоны;
- Водный режим испытывает сильное влияние местных факторов.

Классификация рек по времени существования стока:

- Постоянные;
- Временные (перемерзающие и пересыхающие).

Типы рек по условиям водного потока:

- Горные ($Fr > 1$, бурное состояние потока);

- Полугорные ($0,1 < Fr, 1,0$, состояние спокойное в межень и близкое к бурному в половодье);
- Равнинные ($Fr < 0,1$, состояние потока спокойное).

По степени устойчивости русла реки бывают устойчивые и неустойчивые.

По источникам питания реки могут быть:

- С дождевым питанием;
- С снеговым питанием;
- С ледниковым питанием;
- С подземным питанием.

По водному режиму реки различаются на:

- С весенним половодьем.
- С половодьем в теплую часть года.
- С паводочным режимом.

По ледовому режиму реки можно разделить на замерзающие и незамерзающие.

Рассмотрим несколько интересных рек. Река Каньо Кристалес (Колумбия). В переводе с испанского означает «кристальная река», известна тем, что изменяет свой цвет за счет разных видов водорослей, из-за чего местные жители называют ее «рекой пяти цветов».

Река Конго (республика Конго). На протяжении 350 км между городами Киншаса и Матади река спускается на 270 м, образуя около 70 порогов и водопадов, объединяемых под общим названием водопадов Ливингстона. Глубины на этом участке составляют 230 м и более, что делает Конго наиболее глубокой рекой в мире.

Река Лоа (Чили) – самая длинная река Чили (440 км). Уникальна тем, что, протекая по самой сухой пустыне мира (Атакаме), никогда не пересыхает.

Реки Велна и Нельба (Польша). Возле польского города Вонгровец две речки пересекаются строго под прямым углом. Воды их, нисколько не смешиваясь, дальше текут своими руслами. Секрет такого уникального явления заключается в различиях температур воды в этих реках, разных скоростях и уровнях течений. Неоднократно здесь ставили эксперименты: в Велну наливали красную краску, а в Нельбу – синюю, и в месте пересечения речек краски не смешивались.

Река Волхов (Россия), которая течет вспять. В 12-м столетии жители Новгорода решили изгнать своего духовного пастыря епископа Иоанна из города за его неблагоприятное поведение. Горожане не придумали ничего лучше, как отправить плот со священнослужителем вниз по течению реки Волхов, которая берет начало в озере Ильмень и впадает в Ладожское. Однако не успел плот доплыть до середины речки, как вдруг его понесло течением назад. Удивленные произошедшим религиозные новгородцы восприняли это как «знак свыше» и посчитали вернуть епископа Иоанна на престол.

Подземная река Сак-Актун (Мексика). В пещерах штата Кинтана-Роо, на полуострове Юкатан, Мексика, протекает самая длинная из известных сегодня подземных рек. Изгибы и повороты водного потока по известняковым пещерам простираются на 215 км. Он входит в систему подземных рек, именуемую Сак-Актун, что с языка майя переводится как «белая пещера». Ее суммарная протяженность достигает нескольких десятков тысяч километров, из которых изучено не более 1%.

Река Большой Мендерес (Турция). Ранее носила имя Меандер. Ее русло причудливо извивается на всем течении от истока до устья. Название реки дало жизнь двум терминам: «меандрирование» в гидрологии и «меандр» (узор на греческой вазе) в искусстве.

Река Оникс (Антарктида) – самая длинная река Антарктиды ($l = 30$ км). река впадает в озеро Ванда, но иногда может не достигать ее по несколько лет. Уровень воды подвержен сильным дневным и сезонным колебаниям. Оникс имеет несколько притоков и течет только в период позднего антарктического лета (февраль, март). В этой реке живут исключительно микроорганизмы и водоросли.

Лекция 8. Гидрология рек

Водные объекты в системе межгосударственных отношений

Из 145 имеющихся межгосударственных договоров о трансграничных водных ресурсах, 37% касаются использования воды, 39% – гидроэнергетики, 9% – контроля над наводнениями, 6% – промышленного использования воды, по 4% – вопросов судоходства и загрязнения, 1% – рыболовства. По данным ООН, за всю историю человечества было заключено более 3600 международных соглашений, имеющих отношение к воде.

Пограничная река – водоток, по которому проходит государственная граница.

Международная река – водоток, водные и иные ресурсы которого формируются на территории двух и более государств.

Много информации, касающейся международных речных бассейнов, их использования, конфликтов и пр. можно найти [здесь](#).

В мире не менее 263 речного водосбора, занимающего 45,3% суши (без Антарктиды), являются международными.

Трансграничные речные бассейны России: 60 933 км границы с 16 государствами 70 крупных и средних трансграничных рек. Основные проблемы трансграничных рек (по Гос. Докладу «О состоянии и использовании водных ресурсов...»):

- Загрязнение вод;
- Дефицит водных ресурсов;
- Перераспределение водных ресурсов трансграничных водных объектов;
- Наводнения;
- Неблагоприятные русловые процессы;
- Недостаточно развитая сеть пунктов мониторинга;
- Неудовлетворительное обеспечение гидрологическими прогнозами.

Классификация конфликтов в международных бассейнах:

- Борьба за контроль над водными ресурсами;
- Водные ресурсы используются в качестве военного средства, водные ресурсы – военная цель;
- Водные ресурсы используются в качестве политического средства;
- Водные ресурсы – объект терроризма;
- Конфликты из-за вопросов социального и экономического развития.

Также, конфликты можно разделить на три большие класса:

1. Территориально-пограничные;

Бассейн Амура: сравнительный анализ водопользования на российской и китайской частях бассейна показывает резкую диспропорцию в его

интенсивности и структуре. Причина заключается в различиях в численности населения, степени и направлении хозяйственного освоения территорий.

Проблемы:

- Большие объемы зарегулированного стока, используемые на орошение, внутриводосборную, а в будущем и межбассейновую переброску, уменьшают сток р. Сунгари и других китайских притоков р. Амур и отрицательно сказываются на его водности;
- Крупные предприятия с китайской стороны отрицательно сказываются на качестве воды;
- Русловые деформации обуславливают изменение положения фарватера, по которому проходит государственная граница.

Нерчинский договор – первый договор, определивший отношения Русского государства и Маньчжурской Цинской империей. Заключен 27 августа 1689 г. после военного конфликта 80-х XVII в., причиной которого было стремление маньчжурской династии, воцарившейся в середине XVII в. в Пекине, к завоеванию освоенного русскими Приамурья.

Айгунский договор (1858 г.), Тяньцзинский трактат (1858 г.), Пекинский договор (1860 г.). Четкой границы на Амуре Россия и Китай не обозначили по различным причинам в течении более чем 100 лет – с 1860 по 1990 г.

16 мая 1991 г. – соглашение между СССР и КНР о советско-китайской государственной границе и ее восточной части (число погибших в результате военного столкновения в районе острова Даманский: СССР – 59 человек, КНР – 300-3000 человек).

2. Водопользовательские;

Река Иртыш (Ертис): официально для канала «Черный Иртыш – Каратай» Китай отбирает более 2 км² в год. Канал «Иртыш – Урумчи» направлен на водоснабжение Таримского бассейна, где обнаружены крупные месторождения нефти и газа.

Водоохранилище Эски-Мосул («Дамба Саддама»): построено на гипсовых породах, подверженных карстовым процессам. Мертвый объем – 8 км³. В фундамент плотины уже закачано 50 000 т. жидкого бетона.

Деградация болот южной Месопотамии и озера Хаммар в 1973-2000 г. Площадь массива болот уменьшилась с 20 000 км² до 750 км².

Деградация пальмовых лесов на берегах р. Шатт-эль-Араб.

3. Водно-экологические. Реализация водных проектов на китайской части бассейна р. Аргунь – оценка возможных ущербов:

- Возможное влияние водохозяйственных мероприятий в бассейне и продолжительность, площадь и глубину затопления поймы р. Аргунь на российско-китайском участке;
- Прогнозная оценка смещения растительных сообществ при изменении максимального стока;

- Прогноз русловых деформаций;
- Прогнозные оценки изменения качества воды.

Трансформация проблем для международных водных объектов:

- Объект международного права до XX в.: пограничные водные объекты;
- Объект международного права в XX в.: пограничные и трансграничные водные объекты, водные ресурсы и качество пограничных и трансграничных рек;
- Объект международного права до XXI в.: пограничные и трансграничные водные объекты, водные ресурсы и качество пограничных и трансграничных рек, гидрологический режим;

Река Нил

Бассейн реки Нил делят 11 государств (Бурунди, Египет, Кения, Конго, Руанда, Судан, Танзания, Уганда, Центрально-Африканская Республика, Эритрея, Эфиопия). Очаг формирования стока расположен на территории Эфиопии, около 80% общего стока реки формируется на Абиссинском (Эфиопском) нагорье. В нижнем течении реки расположен Египет. Египет с древних времен сильно зависит от вод Нила, 98% населения Египта проживает в долине Нила. На Нил приходится около 85% потребляемой в стране пресной воды, остальное – грунтовые воды, которые, однако, также подпитываются водами этой реки. 95% стоков наносов дает Голубой Нил.

Значение дельты Нила:

- 45% орошаемых земель Египта;
- 50% промышленного производства;
- 40% с/х продукции;
- 60% улова рыбы;
- 36% рыболовства обеспечивают лагуны на севере дельты;
- 45% населения (26%).

До 1965 г. на участке г. Асуан вершина дельты на водозабор, испарение и инфильтрацию расходовалось 10-20 км³/год. Таким образом, к вершине дельты поступало в среднем 64-74 км³ воды в год. В 1980-1990 гг. потери на испарение составили 10 км³/год. Возросли объемы водозабора. В результате сток воды в нижнем бьефе ВАП заметно сократился и в 1970-90-е гг. составил в среднем 55 км³/год.

Среднегодовой сток наносов до зарегулирования реки составлял по разным данным от 100 до 120 млн. т. Сейчас 90% наносов осаждаются в водохранилищах, оросительных каналах, в виде плодородного ила на полях. Из-за возвратных вод минерализация увеличивается с 160 мг/л в районе ВАП до 250 мг/л в Каире. Уменьшение количества речных наносов приводит к отступанию дельты, следовательно засолению каналов, озероподобных лагун и водоносных горизонтов.

Если в начале XX в. Египет не принимал никаких возражений, касающихся использования водных ресурсов другими странами соглашение о разделе вод Нила 1929 г.: гарантировать воды Нила для Египта, ограничивая в этих правах Судан и отклоняя права других прибрежных стран, то в 1959 г. принято соглашение, по которому сток Нила делится между Суданом и Египтом в объемах 18,5 км³ и 55,5 км³, 25% Судану и 75% Египту.

Эфиопия, на территории которой формируется более 80% стока реки Нил, планирует значительное увеличение использования его главного притока – Голубого Нила – в целях ирригации и гидроэнергетики.

- В 2011 году Эфиопия объявила о начале строительства водохранилища на притоке Голубом Ниле (объем: 74 км³);
- Ответ Египта: «если Нил уменьшится даже на каплю, то ее заменит наша кровь», другие политики Египта высказываются еще более радикально, вплоть до призывов разбомбить плотину. Текущая позиция Египта не столь воинственна.

Инициатива бассейна Нила (ИБН):

- В целом, позитивный пример развития водного сотрудничества в бассейне в последние годы;
- ИБН – партнерство прибрежных стран бассейна реки Нил, инициированное в 1993 г. и запущенное в феврале 1999 г. министрами водного хозяйства 9 стран бассейна (Египет, Судан, Эфиопия, Эритрея, Уганда, Кения, Танзания, Бурунди, Руанда и Конго);
- Цель партнерства стороны определили как «стремление развивать речной бассейн кооперативно, разделяя существенные социально-экономические выгоды и продвигая мир и безопасность в регионе».

Среди других международных бассейнов, где водохозяйственные проекты также вызывают большие дискуссии, - река Селенга. Селенга – трансграничная река, протекающая по территории Монголии и России. Ее длина составляет 1024 км, при этом 409 км нижнего течения проходят по территории России. Площадь бассейна равна 447 тыс. км³, 67% которого находится на территории Монголии. Средний объем годового стока воды Селенги составляет около 29 км³, эта река дает половину притока речных вод в Байкал, причем примерно половина формируется на территории Монголии. Имеет 6 главных притоков, 2 из них полностью расположены на территории России, 2 – на территории Монголии и еще 2 трансграничные.

Селенга – основной поставщик взвешенных и растворенных химических веществ, в том числе и загрязняющих, в оз. Байкал. Уровень очистки вод сильно колеблется: от 10 до 90%, а в некоторых случаях, сточные воды поступают в реку неочищенными.

Среди решений проблемы качества воды: конвенция ООН по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер (1992 г.), межправительственное соглашение «О защите и использовании трансграничных вод» (1005 г.).

В 1966 г. в Хельсинки Ассоциацией международного права были приняты «Правила использования вод международного значения». В ст. 4 говорится, что каждое

государство речного бассейна имеет право в пределах своей территории на разумную и справедливую долю полезного использования вод международного речного бассейна.

Нормативно-правовые условия решения трансграничных водных проблем

Принципы, которыми страны должны руководствоваться при использовании водных ресурсов (исходя из конвенции по оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте, конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер и т. д.):

- Суверенитета государств на свои участки международного водотока;
- Равенства государств в использовании всего международного водотока;
- Сотрудничества государств в использовании ресурсов международного водотока;
- Свободы судоходства;
- Рационального использования водных ресурсов международных рек;
- Предотвращения загрязнения международных рек.

Водосбор и бассейн реки

Водосбор – часть земной поверхности и толщи почво-грунтов, откуда данная река получает свое питание.

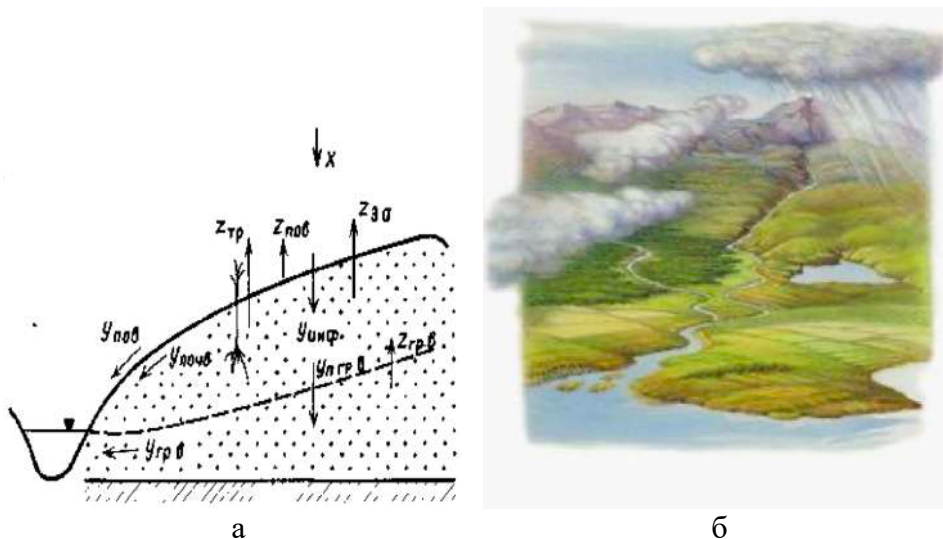


Рис. 8.1. Водосбор подземный (а) и поверхностный (б).

Бассейн реки – часть земной поверхности, ограниченная водоразделом.

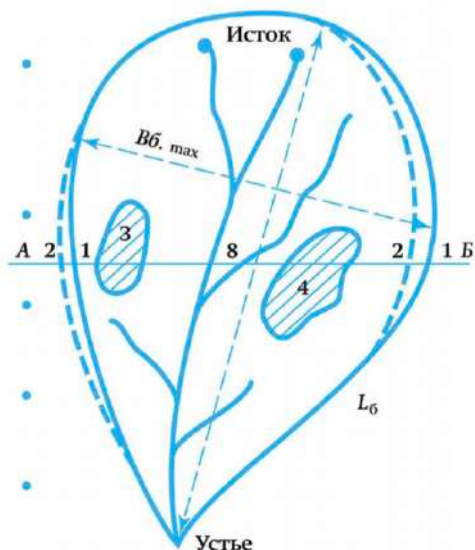


Рис. 8.2. Поверхностный (1) и подземный (2) водосборы, области внутреннего стока (3-4), русла рек (8).

Бассейн реки определяется путем выделения линии хребтов между бассейнами. Входной растр направления стока анализируется с целью поиска всех смежных ячеек, которые принадлежат одной и той же водосборной области. Водосборные бассейны создаются путем размещения точек устьев на краях окна анализа (где вода «вытечет» из растра). Кроме того, определяются локальные понижения. Хатем устанавливается область выше каждой точки устья, из которой осуществляется сток в эту точку. Это приводит к созданию растра водосборных бассейнов.

Возможные отличия понятий «водосбор» и «бассейн»

- Площадь водосбора F_B может быть меньше площади бассейна F_0 (наличие бессточных областей);
- Часть стока воды может формироваться за пределами бассейна ($F_B > F_0$) или уходить за его границы ($F_B < F_0$).

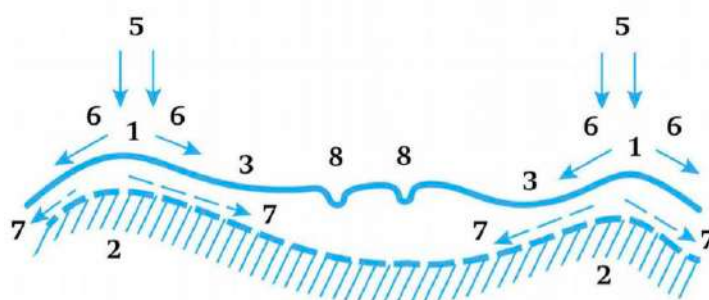


Рис. 8.3. Несовпадение поверхностного и подземного водосбора: водоупор (2), осадки (5), поверхностный (7) и подземный (7) стоки, русла рек (8).

Типы бассейнов:

- Водотоков;
- Болот;

- Озер и водохранилищ ;
- Морей;
- Океанов.

Главный водораздел разделяет бассейны Тихого, Индийского и Атлантического, Северного Ледовитого океанов. Области внутреннего стока – участки земной поверхности, с которых воды не поступает в Мирово океан.



Рис. 8.4. Крупнейшие речные бассейны России.

Общие признаки подобия рек и их бассейнов:

- Географическое положение;
- Зональность климата;
- Высота водосбора;
- Литология поверхности бассейна и зоны аэрации;
- Почвенно-растительный покров размер рек;
- Техногенные нагрузки.

Морфометрические характеристики

Влияние на реки и их режим других водных объектов (болот, озер) и лесов. Коэффициенты заболоченности, озерности, лесистости:

$$K_j = \frac{F_j}{F}, \quad (8.1)$$

где F_j – площадь под болотами, озерами и лесами; F – площадь водосбора реки.

Гидрографическая сеть – совокупность всех водных объектов бассейна реки.

Русловая сеть – совокупность водотоков данного бассейна.

Речная сеть – совокупность наиболее крупных водотоков.

Очень редко на аккумулятивных равнинах водоразделы провести невозможно, так как масса воды одной реки делится на две части, направляющиеся в разные речные системы. Такое явление раздвоения течения называется бифуркацией реки. Пример бифуркации: раздвоение реки Ориноко в верхем течении. Встречаются бифуркации рек, текущих по Приморским низменностям северо-востока России между устьями Индигирки и Колымы.

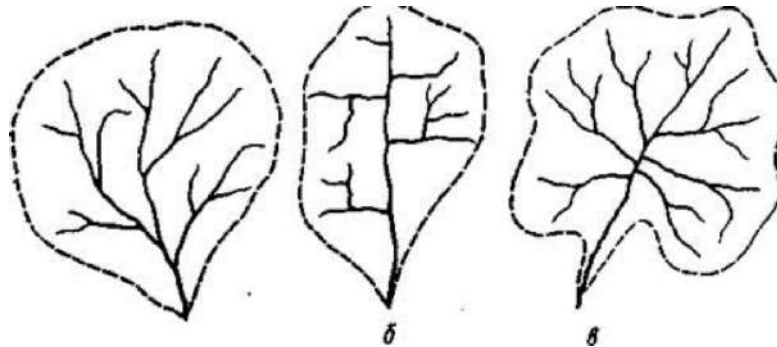


Рис. 8.5. Типы речных систем: дендрическая (а), прямоугольная (б), центростремительная (в).

Причины изменения речной сети:

- Тектоника;
- Эрозионно-аккумулятивные процессы;
- Эволюция ледников;
- Колебания уровня приемных водоемов;
- Хозяйственная деятельность.

Морфометрические характеристики бассейна реки:

- Площадь F ;
- Длина L ;
- Максимальная V_{bt} и средняя V_b ширина;
- Длина одораздельной линии L_B .

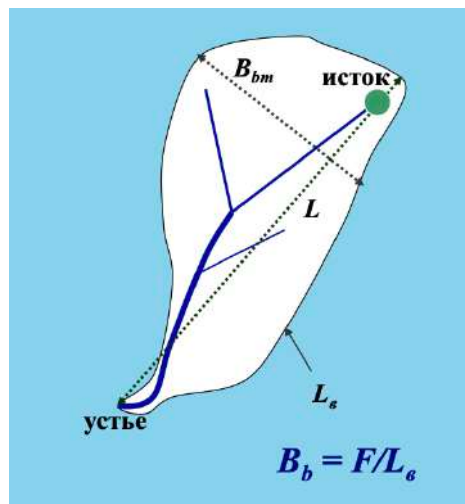


Рис. 8.6. Графическое изображение рассматриваемых характеристик. Извилистость рек и густота речной сети. Коэффициент извилистости участка реки:

$$k_{и} = \frac{l_i}{L} > 1 \quad (8.2)$$

$k_{и}$ для всей реки:

$$k_{и} = \frac{\sum_{i=1}^M l_i}{\sum_{i=1}^M L_i} \quad (8.3)$$

где $\sum l_i$ – протяженность русловой сети (км). Густота речной сети (км/км²):

$$D = \frac{\sum l_i}{F} \quad (8.4)$$

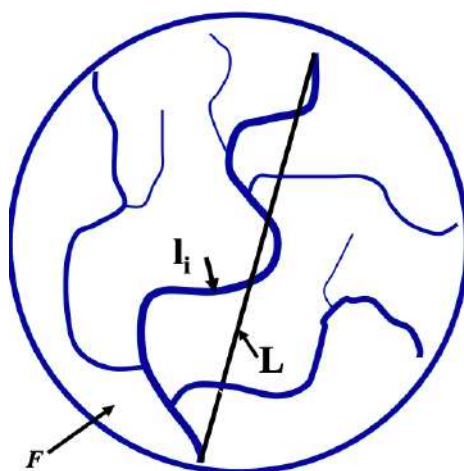


Рис. 8.7. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Лекция 9. Водный баланс бассейна реки

Исток и устье реки

Исток – место начала реки (ледник, родник, болото, озеро).



Рис. 9.1. Исток.

Устье – место впадения реки в другую реку, озеро, море.

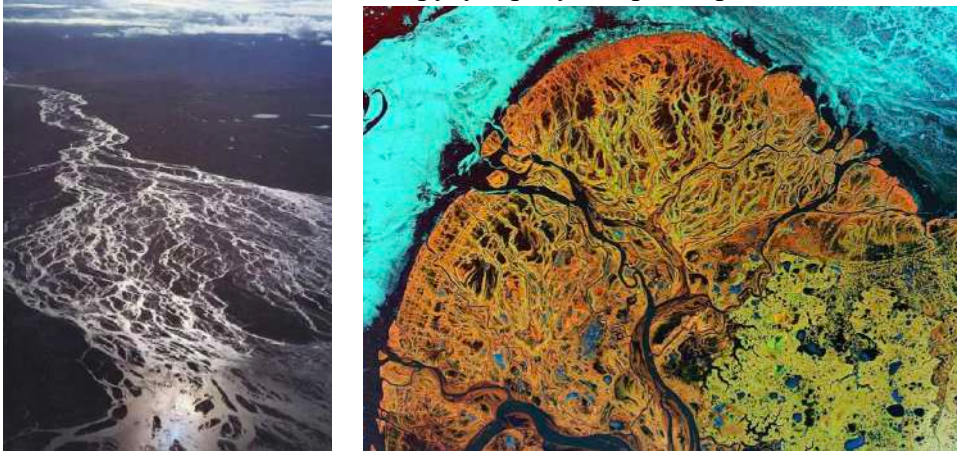


Рис. 9.2. Устье.



Рис. 9.3. Слияние рек.

Питание рек

Выделяют следующие источники (атмосферные осадки, проходящие определенный путь с момента выпадения до момента попадания в русловую сеть) питания рек:

Вид питания	Рейтинг значимости	Район доминирования
Дождевое	1	Реки муссонного и экваторного климата
Снеговое	2	Реки в зоне умеренного климата

Подземное	3	Характерен для всех рек, формирует до 1/3 речного стока
ледниковое	4	Характерен для районов оледенения, формирует до ~1% речного стока

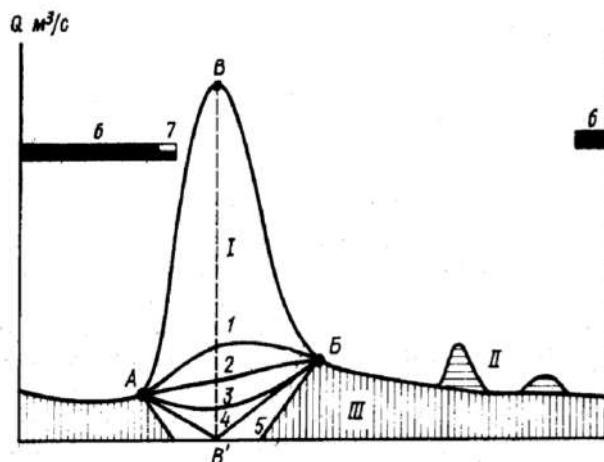


Рис. 9.4. Схема расчленения гидрографа реки по видам питания: I — снеговое, II — дождевое, III — подземное питание. А, Б и В — начало, конец и пик половодья, 1–5 — линии, разделяющие снеговое и подземное питание в период половодья при различном характере взаимодействия речных и грунтовых вод, б — ледостав, 7 — ледоход.

Постоянная односторонняя гидравлическая связь:

- Низкое положение водоупора и уровня грунтовых вод;
- Река постоянно подпитывает подземные воды;
- Характерно для карстовых районов, горных рек аридной зоны

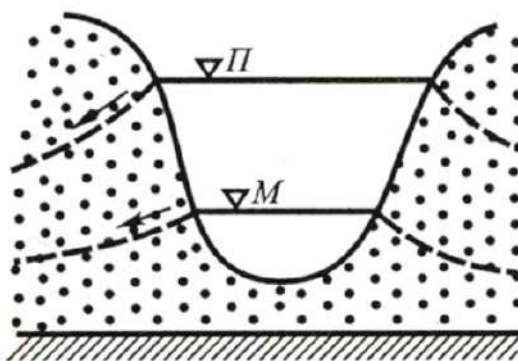


Рис. 9.5. Постоянная односторонняя гидравлическая связь.

Постоянная двусторонняя гидравлическая связь – русловое регулирование:

- Река питает грунтовые воды в половодье;
- В реку поступают грунтовые воды в межень.

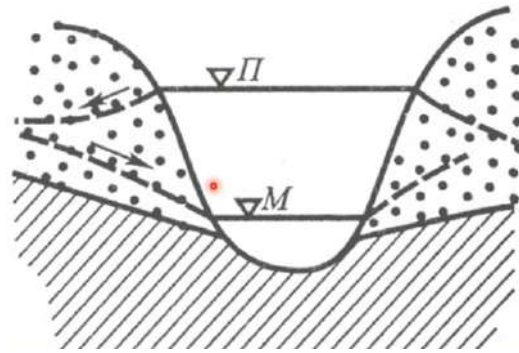


Рис. 9.6. Постоянная двусторонняя гидравлическая связь.

Метод исследования и данные: GrWat – программа по автоматическому расчленению гидрографа, использующая графоаналитический метод и комплексный анализ.

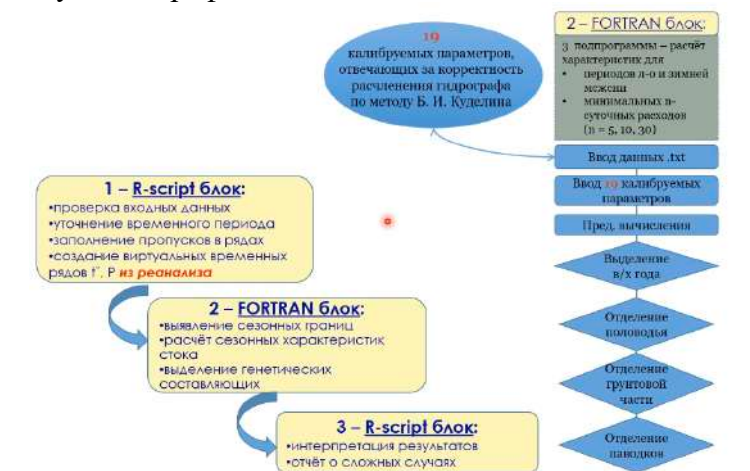


Рис. 9.7. GrWat: общая идея.

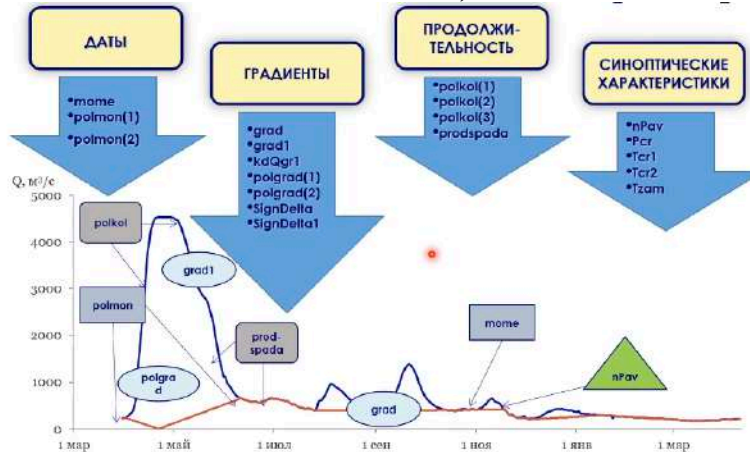


Рис. 9.8. GrWat: калибруемые параметры.

1 – R-script блок:

Использование реанализа

- Daily NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis V2
- Период: 1948–2012 гг.



Критерий для выделения паводочных волн $q \geq Q_{50}$

- $q(90\%) < q_{50} < q(50\%)$, 10 – 30% пиков – незначительные;
- $q_{50} < Q_{max}(95\%)$, all annual max $> Q_{50}$;
- $Q_{50}(70\%) < q_{50} < Q_{50}(30\%)$, q_{50} close to Q_{50} ;
- $q_{50} > q_5(5\%)$, q_{50} is higher than local min (95% probability)

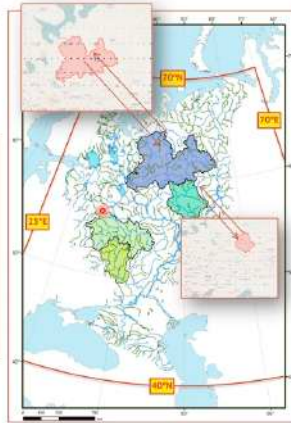


Рис. 9.9. GrWat: использование реанализа.

2 – FORTRAN блок:

Особенности отделения оттепельных паводков:

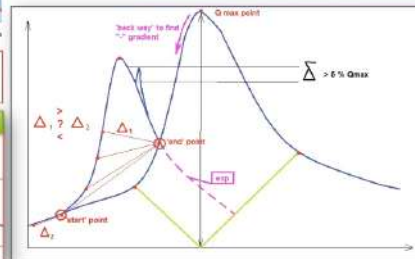
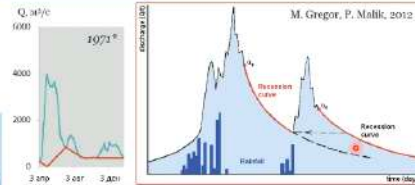
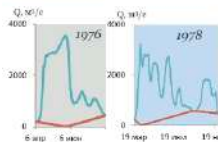


Рис. 9.10. GrWat: особенности отделения оттепельных паводков.

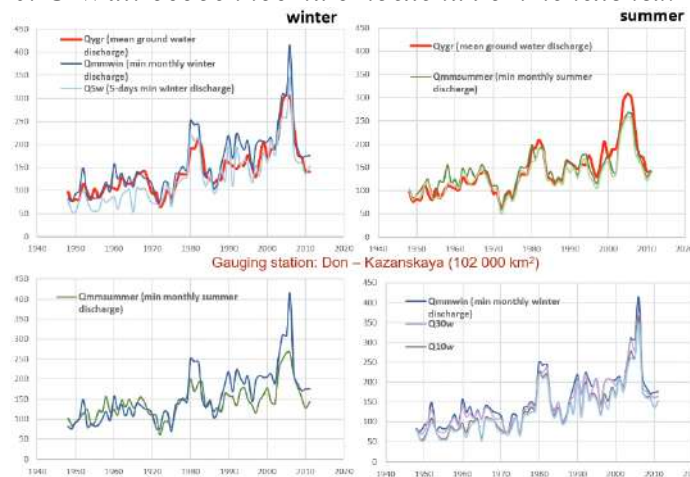


Рис. 9.11. GrWat: изменение подземного стока и минимального стока.

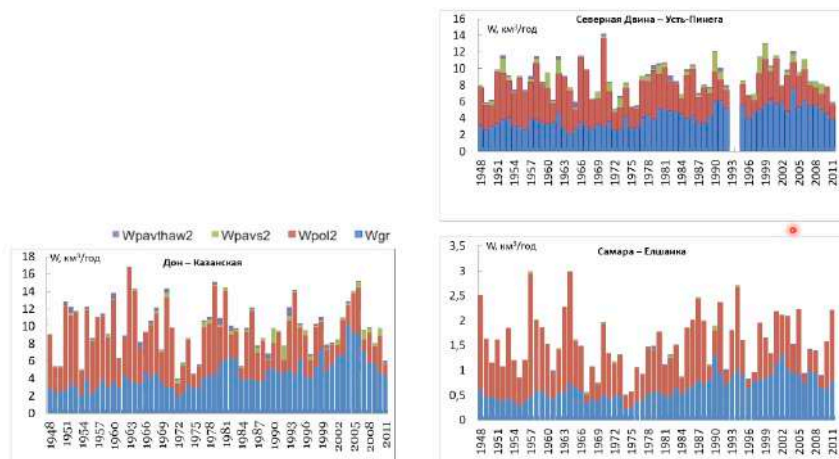


Рис. 9.12. Результаты объемов грунтового стока, стока воды за половодье, дождевые и талые осадки.

Тип водного режима рек ЕТР, особенно Центральной России, изменился и тяготеет к Западно-Европейскому с влажной и теплой зимой.

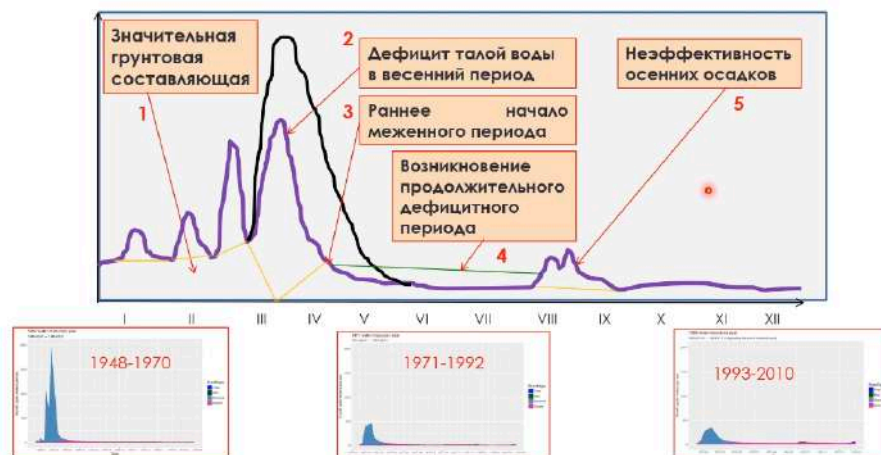


Рис. 9.13. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Еще один путь, помимо графоаналитических методов, – это математическое моделирование. Одна из наиболее современных моделей – информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (ECological Model for Applied Geophysics).

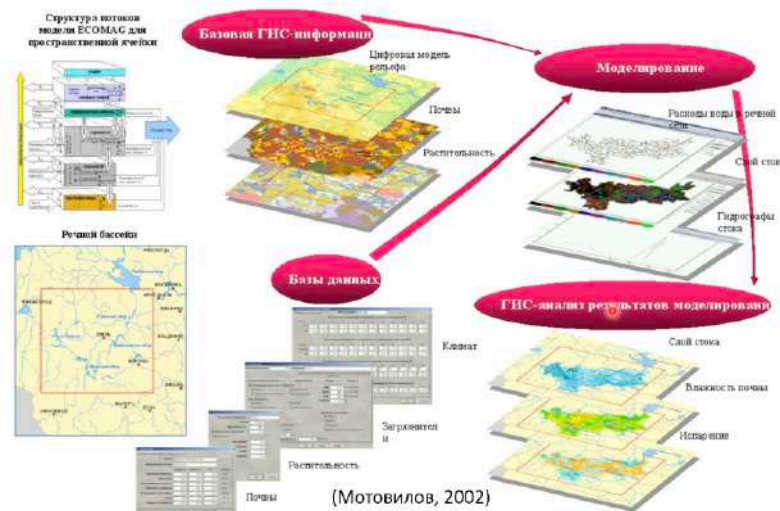


Рис. 9.14. Структура ECOMAG.

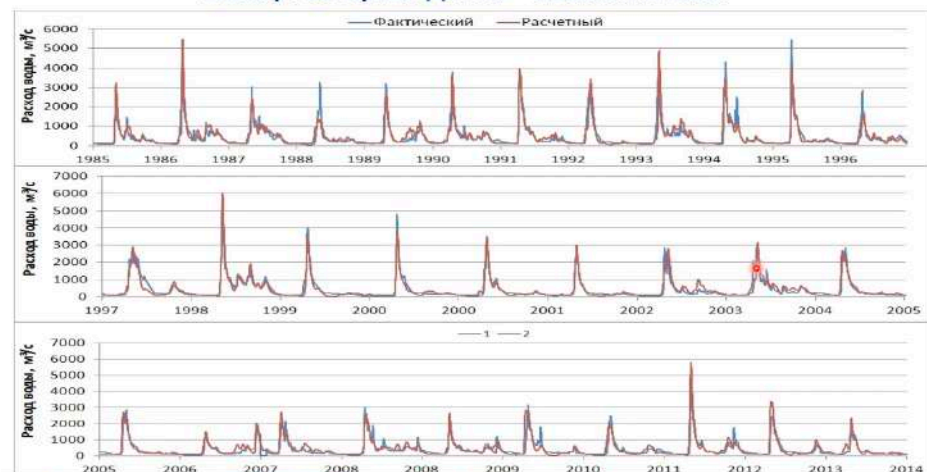


Рис. 9.15. Калибровка и верификация модели формирования стока р. Северная Двина – г. Великий Устюг.

Классификация рек по сочетанию видов питания

Классификация А. И. Воейкова (качественная);

- Реки с преимущественно снеговым и ледниковым питанием;
- Реки с преимущественно дождевым питанием;
- Реки с отсутствием постоянного питания.

Классификация М. И. Львовича (количественная):

Роль (α) данного источника в формировании годового стока воды (%)	Значение источника питания	Тип реки
≥ 50	Доминирующее	С исключительным ледниковым питанием

$25 < \alpha < 50$	Преимущественное	С преимущественным ледниковым питанием
< 25	Ординарное	Со смешанным питанием

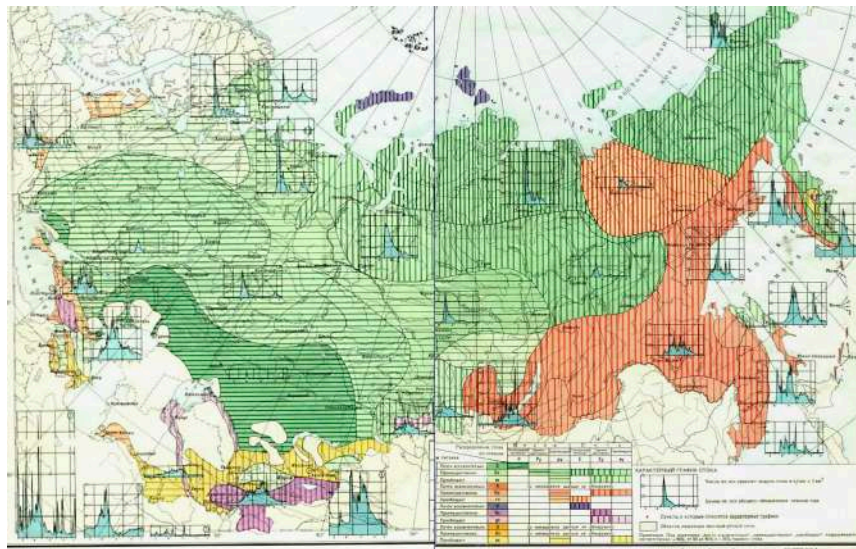


Рис. 9.16. Карта типов рек по классификации Львовича.

Зональные и аazonальные источники питания	Сезонное распределение стока											
	весна			лето			осень			зима		
	P	Py	py	E	Ey	ey	A	Ay	ay	H	Hу	hy
Дождевое	R	2	23		41	37		25	33	1	11	14
	Rx	7	43	2	43	42		25	48		12	36
	rx	4	15		9	6			1			9
Снеговое	S	9	3	2								
	Sx	3	44	23	5	12	7					
	sx		2	19	1	21	16				1	1
Ледниковое	G											
	Gx				2							
	gx		2		14	5						
Подземное	U	Равномерное распределение стока										
	Ux				4			1	2		1	2
	ux		5		1							
Пустынный	D	3										
Зарегулированный	L	27										
Полизональный	Pz	24										

Примечание. Светлым выделены типы водного режима рек, выявленные М. И. Львовичем, а темным — впервые реально найденные или ранее не известные типы. Цифрами внутри клеток обозначается количество примеров рек данного типа из рассмотренных 750-ти.

Сочетание двух рассмотренных выше признаков, принятых для классификации, по мнению М. И. Львовича, дает более или менее полную характеристику основных черт водного режима рек земного шара. Для краткости обозначения групп водного режима принята система условных буквенных обозначений. Так, например, водный режим, характеризующийся преимущественно дождевым питанием летом, обозначается RxEy, а определяющийся почти исключительно снеговым питанием весной, обозначается SP.

Рис. 9.17. Частота встречаемости отдельных типов водного режима рек по преобладающему источнику питания и сезону с преобладающим стоком.

Распространение рек с преимущественным типом питания на территории СНГ:

- Снеговым: реки Заволжья, Казахстана;
- Дождевым: реки в бассейне Амура, Яны, Индигирки, Северного Кавказа и Крыма;
- Ледниковым: реки Кавказа, Средней Азии.

Лоа – самая длинная (440 км) река Чили. Истоки реки находятся в Андах на высоте более 4 тыс. м. над уровнем моря на склонах вулкана Миньо. Далее Лоа течет сквозь пустыню Атакама по берегам, образуя оазисы. Впадает в Тихий океан. также Лоа служит границей между чилийскими областями Тарапака и Антофагаста. Расход воды у устья – около $6 \text{ м}^3/\text{с}$, в среднем течении – $2,43 \text{ м}^3/\text{с}$.



Рис. 9.18. Река Лоа с преимущественно подземным источником питания.

Водный баланс бассейна реки

Упрощенное уравнение водного баланса для речного бассейна:

$$Y = X - Z \pm \Delta u, \quad (9.1)$$

где x – осадки, z – испарение, y – сток воды, Δu – изменение запасов воды в бассейне реки.

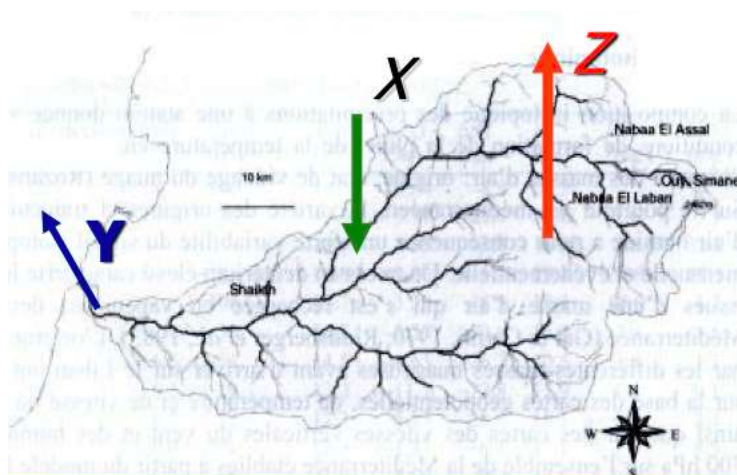


Рис. 9.19. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Составляющие водного баланса (ед. изменения: [мм], [м^3 , км^3]):

- Приходные (x)
- Расходные (z, y)

Если $Y + Z > X, \Delta u < 0$, то запасы воды истощаются

Если $Y + Z < X, \Delta u > 0$, то запасы воды увеличиваются

Уравнение водного баланса за многолетний период:

$$Y + Z = X \quad (9.2)$$

Структура водного баланса:

- $Y + Z = X$;

- $\alpha + \beta = \frac{Y}{X} + \frac{Z}{X} = 1$;
- $\alpha + \beta = \frac{Y}{X}$ – коэффициент стока ($\alpha < 1$);
- $\beta = \frac{Z}{X}$ – индекс сухости ($\beta \leq 1$).

Изменчивость коэффициента стока:

- Зона избыточного и достаточного увлажнения (тундра, лесотундра, леса)

$$\alpha = 0,4 - 0,6$$

- Зона недостаточного увлажнения (лесостепь, степь)

$$\alpha = 0,1 - 0,4$$

- Зона засушливого климата (полупустыни, пустыни)

$$\alpha \rightarrow 0$$

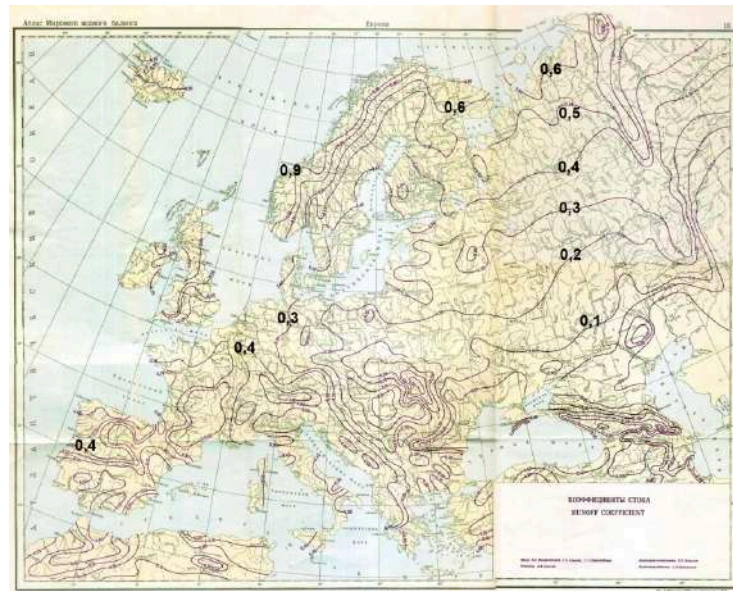


Рис. 9.20. Европа. Коэффициент стока.

Уравнение водного баланса для речного водосбора:

$$P - E - R - (TWS_{\text{кон}} - TWS_{\text{нач}}) = 0, \quad (9.2)$$

где P – осадки, E – испарение, R – речной сток, $TWS_{\text{кон}}$ – влагозапасы на конец периода, $TWS_{\text{нач}}$ – влагозапасы на начало периода.

- В среднем для ЕЧР слой осадков вырос на 6%
- Рост более 7% на юге бассейна Дона
- Сокращение на 10% в бассейне Мезени

Изменения за 1978 – 2014 гг. по сравнению с 1945 – 1977 гг., %

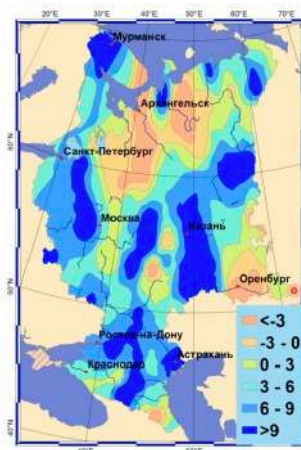


Рис. 9.21. Изменение режима осадков: слой годовых осадков.

Области роста и уменьшения совпадают с таковыми для слоя годовых осадков.

Формула расчета абсолютной неравномерности

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|}{n^2}$$

Изменения за 1978 – 2014 гг. по сравнению с 1945 – 1977 гг., %

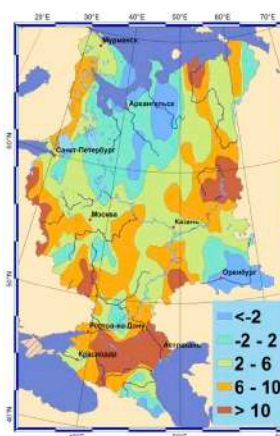


Рис. 9.22. Изменение режима осадков: абсолютная неравномерность осадков теплого периода.

Рост относительной неравномерности связан с сокращением количества дней с осадками

Формула расчета относительной неравномерности

$$RMD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|}{\bar{x}n^2}$$

Изменения за 1978 – 2014 гг. по сравнению с 1945 – 1977 гг., %

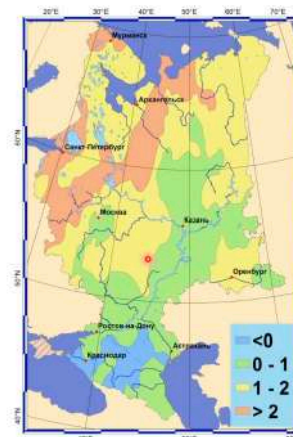


Рис. 9.23. Изменение режима осадков: относительная неравномерность осадков теплого периода.

Из рис. 9.24 заметно наличие предпосылок для формирования наводнений в теплый период. времени

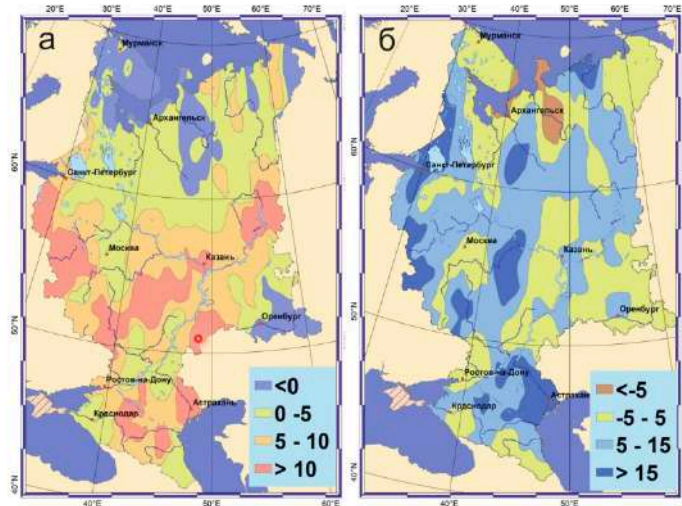


Рис. 9.24. Изменение средней интенсивности осадков (а) и максимальных суточных осадков теплого периода (б) за 1978-2014 по сравнению с 1045-1977 гг., %.

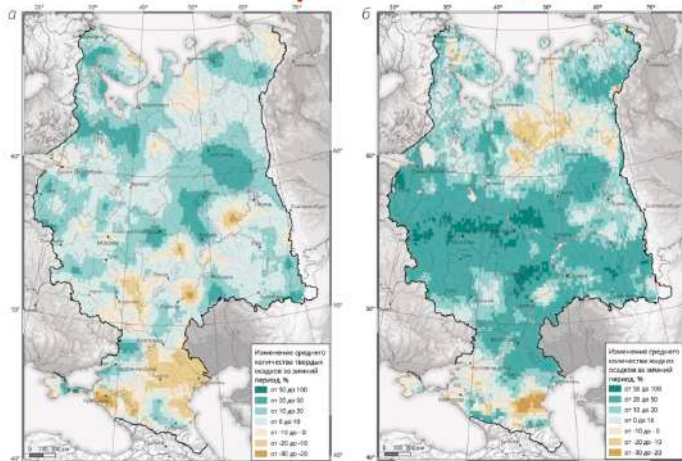
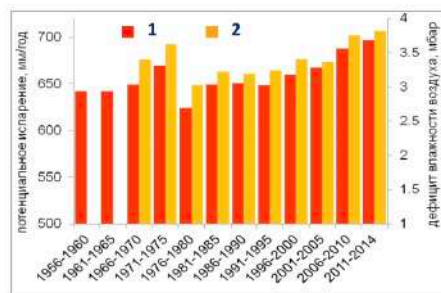


Рис. 9.25. Изменение доли твердых (а) и жидких осадков (б) за зимний период (%).



Осредненная по ЕТР динамика потенциального испарения (1) и дефицита влажности воздуха (2)



Изменения за 1978 – 2014 гг. по сравнению с 1945 – 1977 гг., %

Рис. 9.26. Изменение потенциального испарения.

Ранее трудноизмеримые изменения, касающиеся влагоспасов, сейчас научились измерять с помощью спутниковых данных (например, спутниками GRACE, о которых мы говорили ранее).

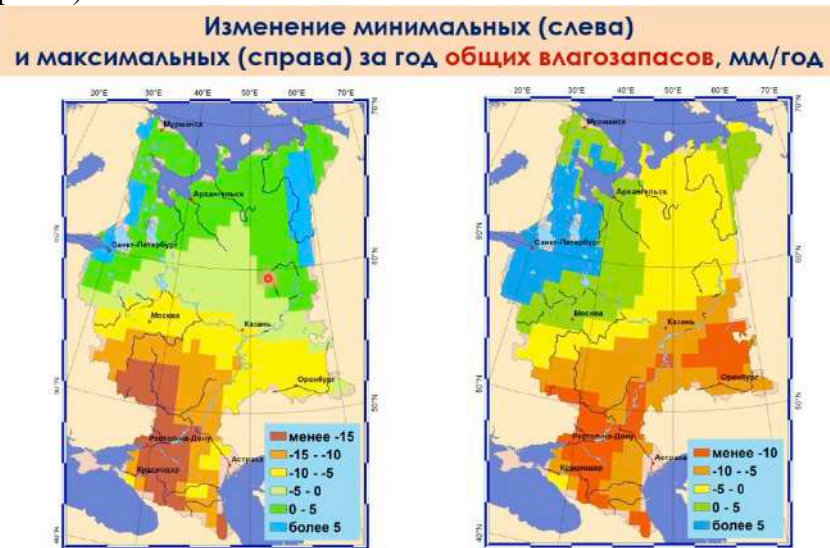


Рис. 9.27. Динамика бассейновых влагоспасов за 2002-2015 гг.

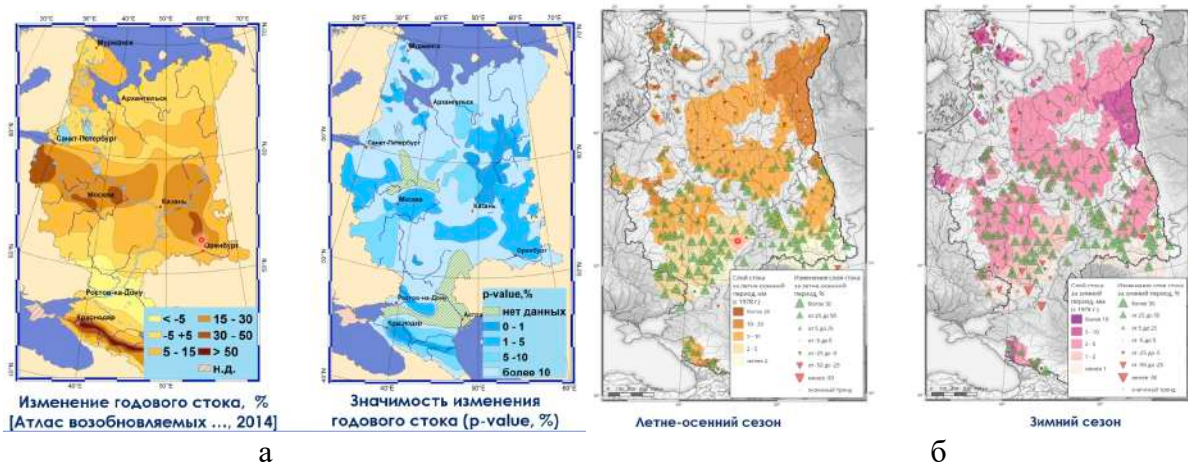


Рис. 9.28. Изменение годового стока (а) и сезонного стока (б).

Коэффициент трансформации водного режима (КТР) – синтетическая количественная характеристика, рассчитываемая по изменениям гидрологических характеристик:

- Среднегодовой расход;
- Максимальных расход;
- Доля стока за «весенний» период;
- Доля стока за «зимний» период;
- Базисный сток.

Значения коэффициента разделены экспертным путем на пять классов: незначительная (до 15%), умеренная, средняя (15-30%), значительная (30-45%), катастрофическая (>60%) трансформация.

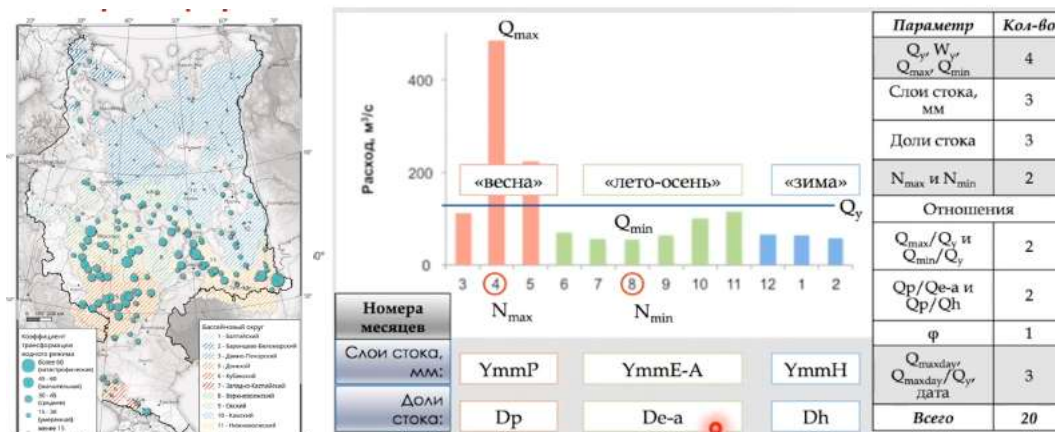


Рис. 9.29. Синтетические карты: оценка трансформации водного режима. Возможности районирования были исследованы на основе четырех показателей, привязанных к гидропостам:

- Месяц прохождения максимального месячного стока;
- Доля стока за весенний сезон;
- Отношение максимального расхода к среднегодовому;
- Коэффициент естественной зарегулированности.

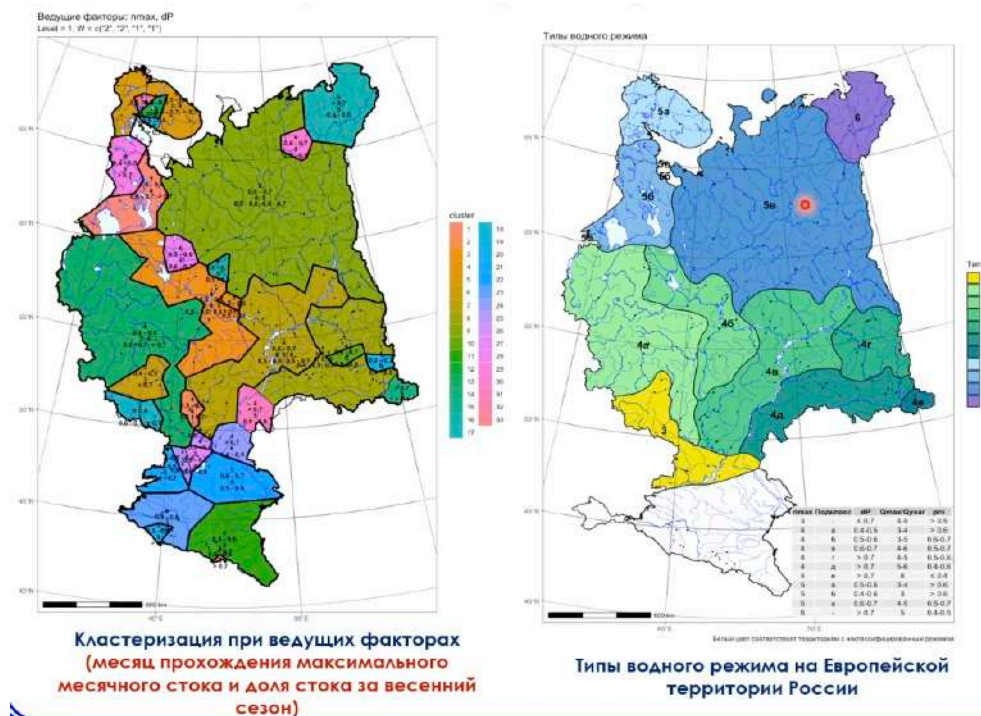


Рис. 9.30. Карта водного режима рек ЕТР.

Картографическое [веб-приложение](#) «Водный режим рек ЕТР» – предоставляет доступ к базам данных и картам, подготовленным в рамках проекта. Создано на основе открытых технологий с использованием трехуровневой архитектуры: сервер баз данных,

ГИС-сервер и веб-сервер. В рамках приложения организована возможность выполнения запросов к данным гидропостов через картографический интерфейс.

Фазы водного режима рек

Водный режим – закономерные пространственно-временные изменения гидрологического состояния рек. Фазы:

1. Межень;
2. Половодье;
3. Паводки.

Водоносность реки – количество воды в реке (в т.ч. в среднем за многолетний период времени Q_0). Используется для сравнения величины стока воды разных рек.

Водность реки – изменение количества воды в реке по сравнению с средними многолетними условиями $K_i = \frac{Q_i}{Q_0}$.

Гидрограф реки – график изменения расхода воды в данном растворе реки в течение года.

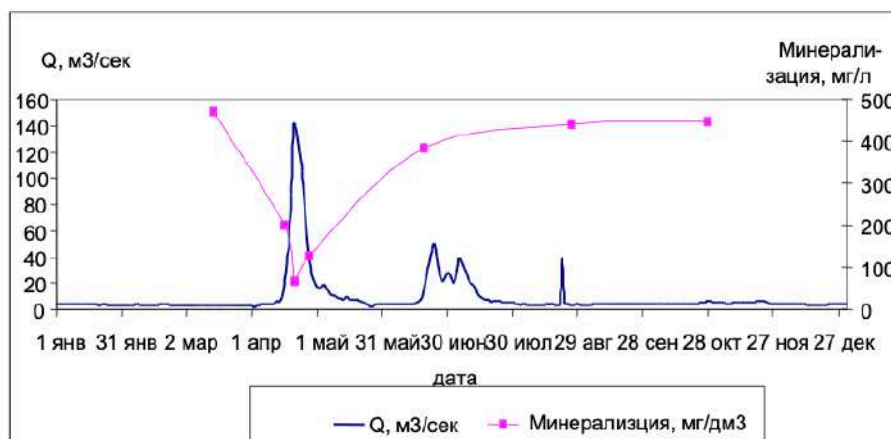


Рис. 9.31. Гидрограф р. Устье (д. Дуброво, 1963 г.).

Половодье – ежегодно повторяющаяся фаза водного режима реки, отличающаяся наибольшей водностью и высокими уровнями воды. Типы:

- Весеннее;
- Весенне-летнее или летнее.

Паводок – устойчиво повторяющаяся фаза водного режима, характеризующаяся кратковременным увеличением расходов и уровней воды. Генезис паводков:

- Выпадение дождей;
- Снеготаяние.

Межень – ежегодно повторяющаяся (в один и тот же сезон года) фаза водного режима, характеризующаяся малой водностью, длительным стоянием низких уровней воды. Типы:

- Осенне-зимняя;

- Зимняя;
- Летняя.

Классификация рек по водному режиму

Классификация Б. Д. Зайкова:

- С весенним половодьем;

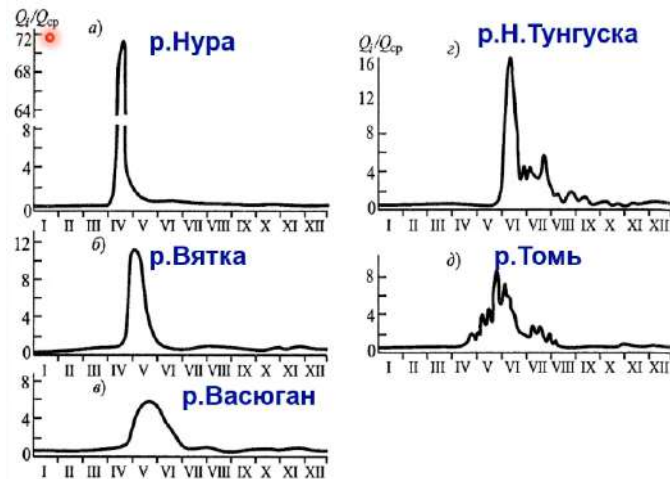


Рис. 9.32. Типы водного режима рек с весенним половодьем: казахстанский (а), восточно-европейский (б), западносибирский (в), восточносибирский (г), алтайский (д).

- С половодьем в теплую часть года;

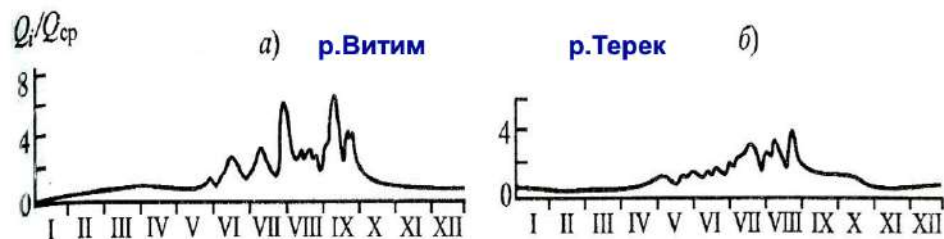


Рис. 9.33. Типы водного режима рек с половодьем в теплую часть года: дальневосточный (а), тьянь-шанский (б).

- С паводками.

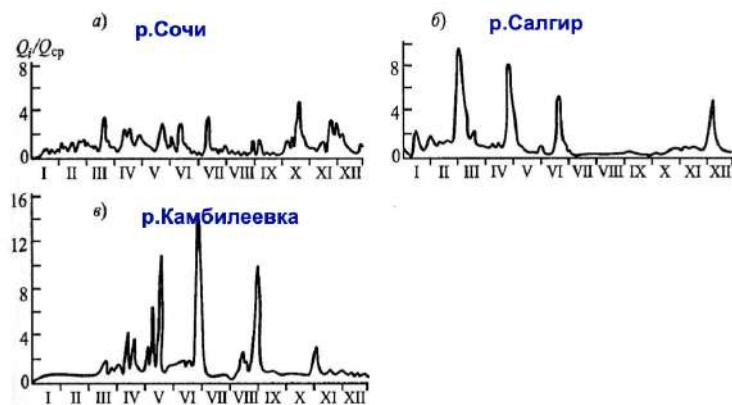


Рис. 9.34. Типы водного режима рек с паводками: причерноморский (а), крымский (б), северокавказский (в).

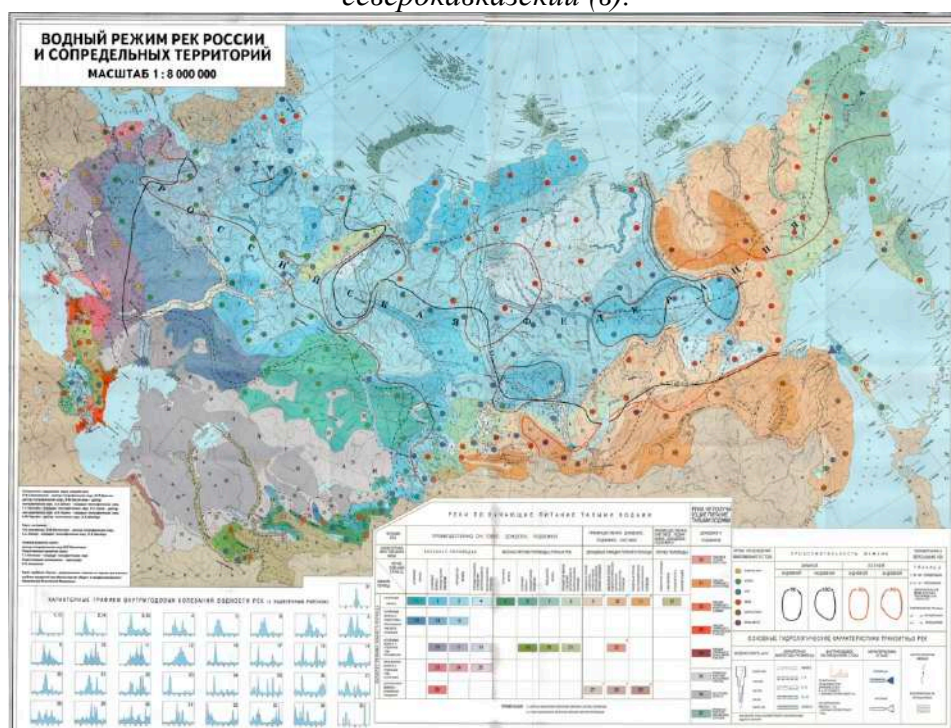


Рис. 9.35. Водный режим рек России и сопредельных территорий.

Лекция 10. Гидрологические характеристики стоков

Расход воды

Основные гидрологические характеристики:

- Расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$);
- Мутность s ($\text{кг}/\text{м}^3$);
- Минерализация c ($\text{кг}/\text{м}^3$);
- Биомасса r ($\text{кг}/\text{м}^3$);
- Температура t ($^\circ\text{C}$);

Средний расход воды за период времени M (декада, месяц, год, многолетний период):

$$Q_0 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i \quad (10.1)$$

Средний многолетний расход воды – норма стока. Расчет годового или многолетнего объема стока воды:

$$W_Q, \text{ м}^3, W_Q = Q_0 * 31,5 * 10^6 \quad (10.2)$$

$$W_Q, \text{ км}^3, W_Q = Q_0 * 31,5 * 10^{-3} \quad (10.3)$$

Слой стока y (мм) – слой воды, равномерно распределенный по площади водосбора:

$$y(\text{мм}) = \frac{10^{-3} W_Q(\text{м}^3)}{F(\text{км}^2)} = \frac{10^6 W_Q(\text{км}^3)}{F(\text{км}^2)} \quad (10.4)$$

Модуль стока воды M_q – количество воды, стекающее с единицы площади водосбора в единицу времени:

$$M_q (\text{л}/(\text{с} * \text{км}^2)) = \frac{10^3 Q_0(\text{м}^3/\text{с})}{F(\text{км}^2)} \quad (10.5)$$

$$Y(\text{мм}) = M_q * 31,5 \quad (10.6)$$

Коэффициент стока – отношение слоя стока к слою атмосферных осадков:

$$\alpha = \frac{y}{x} \quad (10.7)$$

Пример расчета характеристик стока для устья Волги:

- Средний слой осадков $x = 660$ мм;
- Площадь водосбора $F = 1\,360\,000$ км^2 ;
- Средний многолетний расход воды $Q_0 = 7780$ $\text{м}^3/\text{с}$;
- Объем стока $W_Q = 245$ $\text{км}^3/\text{год}$;
- Модуль стока $M_q = 5,64$ $\text{л}/(\text{с} * \text{км}^2)$;
- Слой стока $y = 180$ мм;
- Коэффициент стока $\alpha = 0,27$.

Распределение стока воды по территории СНГ

Факторы пространственного изменения стока воды:

- Широтная зональность изменения слоя осадков;

- Континентальность климата;
- Орографическое увеличение стока воды;
- Увеличение стока по длине рек вследствие впадения боковых притоков;

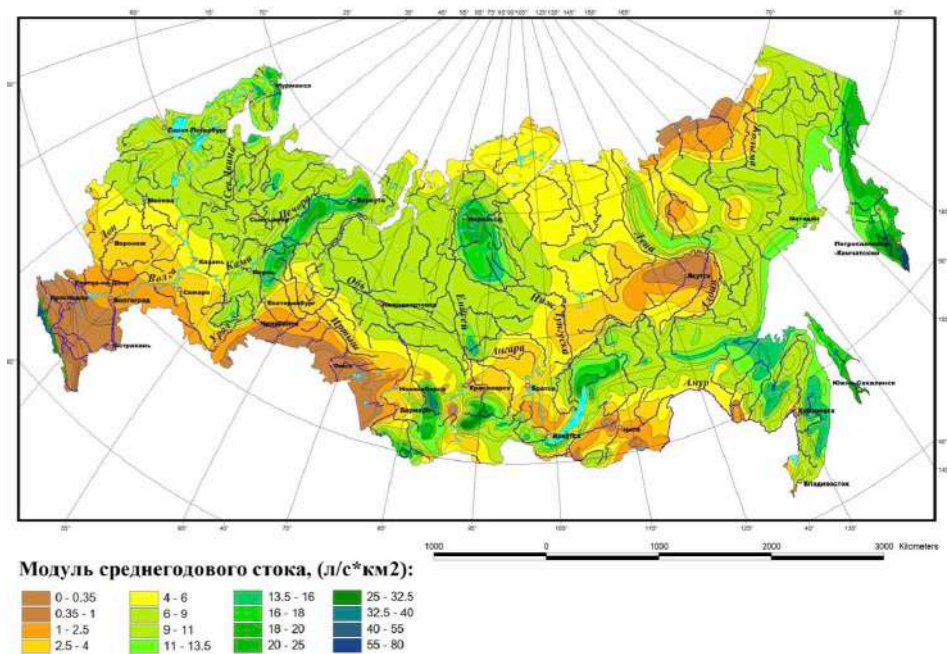


Рис. 10.1. Среднегодовой модуль стока рек России.

Лекция 11. Движение воды в реках

Распределение скоростей течения в речном потоке

Скорость движения воды:

- В конкретной точке потока – местная скорость u , м/с;
- Средняя скорость по глубине водного потока v , м/с;
- Средняя скорость в поперечном сечении реки V , м/с;

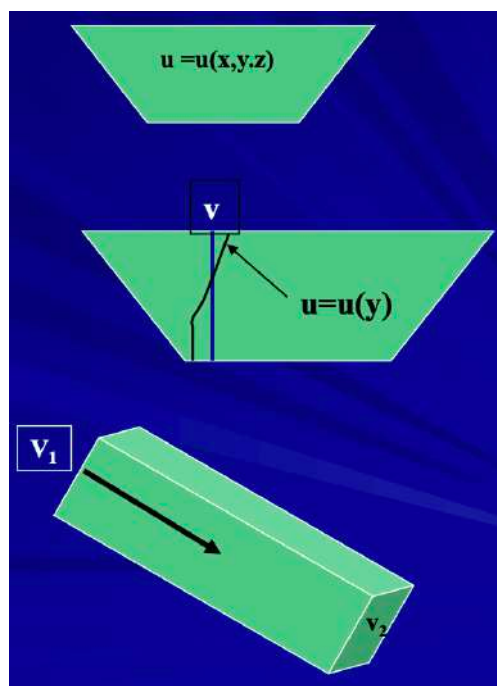


Рис. 11.1. Графическое изображение рассматриваемого случая.

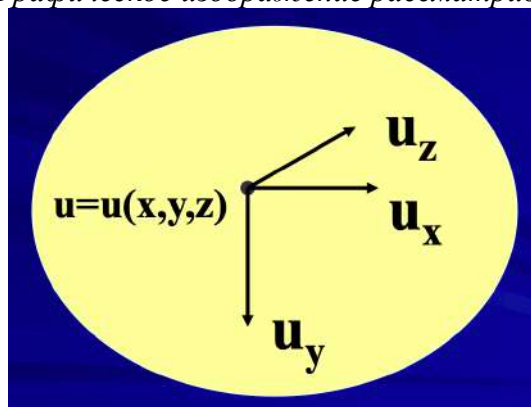


Рис. 11.2. Компоненты местной мгновенной скорости.

Для рек характерен турбулентный режим движения воды, и скорость течения в любой точке речного потока подвержена турбулентным пульсациям.

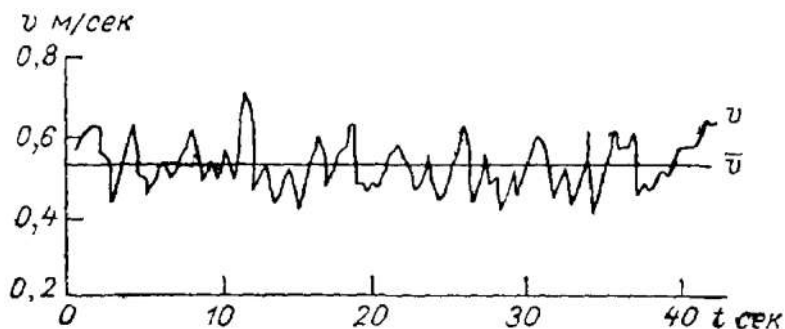


Рис. 11.3. Изменение продольной составляющей скорости.

Одним из самых простейших и давно используемых приборов для измерения величины скорости является трубка Пито-Прандтля. Так, опускается трубка с загнутым концом. В зависимости от величины скорости уровень воды поднимается на ту или иную высоту. Зная эту высоту, можно определить скорость.

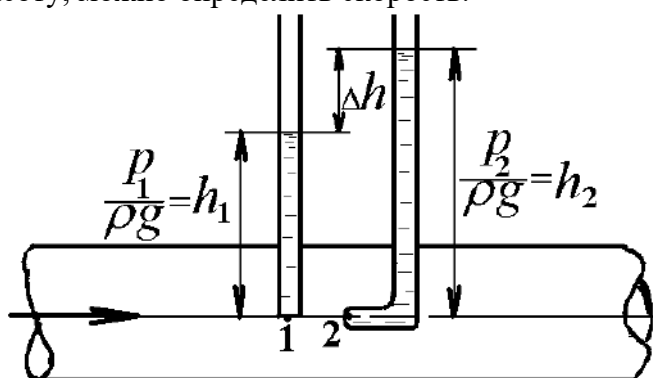


Рис. 11.4. Трубка Пито-Прандтля.

Создателем первой гидрометрической вертушки считают немецкого гидротехника Рейнгарда Вольтама (1767-1837 гг.), впервые применившего такой прибор в 1790 г. для определения скорости течения реки Эльбы.

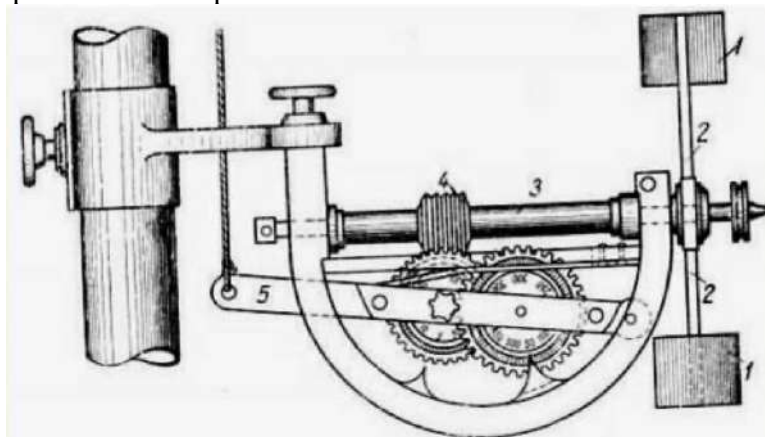


Рис. 11.5. Гидрометрическая вертушка Вольмана (1790).

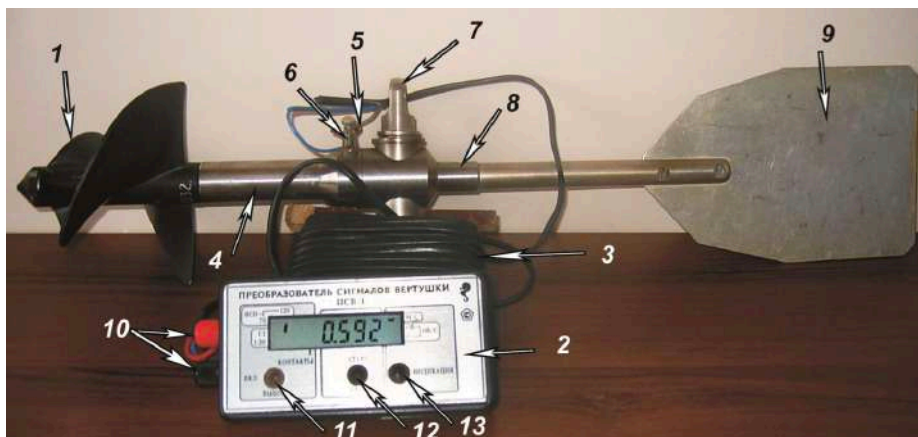


Рис. 11.6. Измеритель скорости потока (ИСП-1М): лопастной винт (1), преобразователь сигналов вертушки (2), электрический провод (3), ось вертушки, находится внутри под ее корпусом (4). Клеммы: изолированная (5), соединенная с корпусом (6), винт (7), винт стабилизатора (8), стабилизатор (9), контакты преобразователя (10). Кнопки преобразователя сигналов: выбор (11), старт/стоп (12), индикация (13).

Последовательность измерений скорости выглядит следующим образом: есть поперечное сечение, мы назначаем скоростные вертикали (I, II, III, IV на рис. 11.7) – места, где производятся измерения скоростей течения, и положения точек, на которые опускается гидрометрическая вертушка. Если глубины небольшие, то количество измерений колеблется от 1 до трех. Если глубина больше 1 метра, то используется 5-точечный способ измерения.

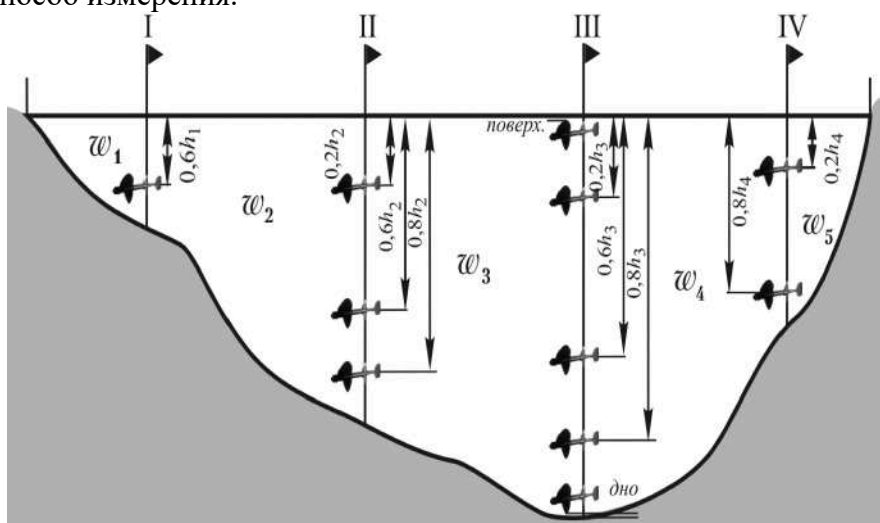


Рис. 11.7. Схема расположения точек на скоростных вертикалях гидрометрического створа.

График изменения скорости по вертикали называется эпюрами скорости.

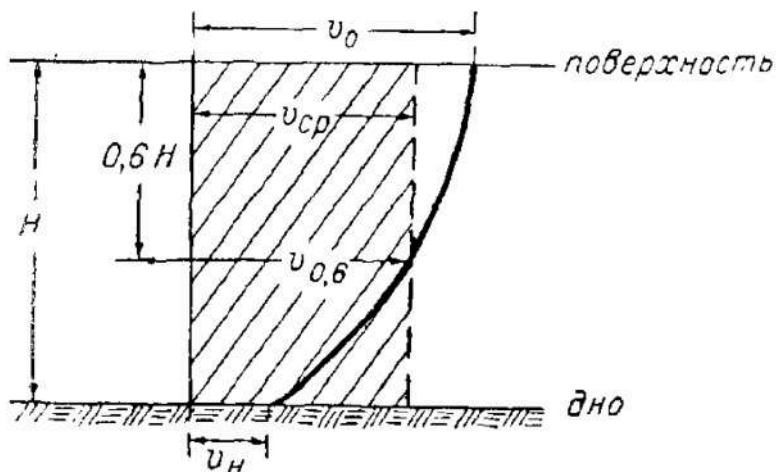


Рис. 11.8. Характерная эпюра распределения скорости по вертикали речного потока.

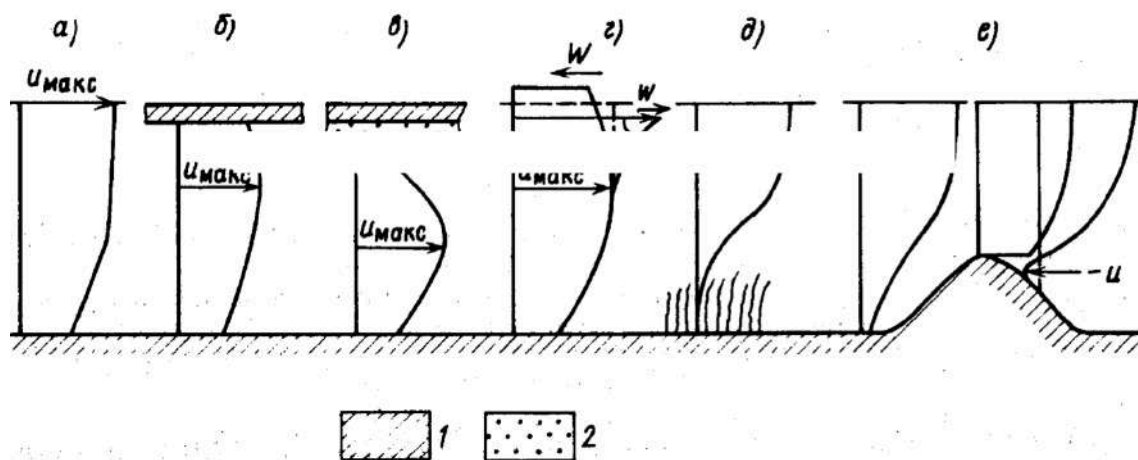


Рис. 11.9. Эпюры местных скоростей: типичное (а), под ледяным покровом (б), под слоем внутриводного льда-шуги (в), при попутном и встречном ветре (г), при влиянии растительности (д), при влиянии неровностей дна (е). Ледяной покров (1), слой шуги (2). W – направление ветра, $u_{\text{макс}}$ – максимальная скорость течения, $-u$ – обратное течение.

Изотахи – линии равных скоростей (рис. 11.10).

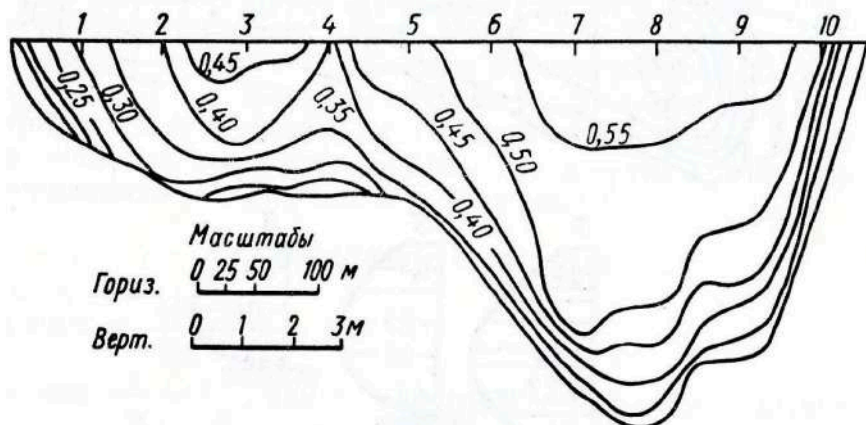


Рис. 11.10. Профиль живого сечения реки с изотахами (м/с).

Ледяной покров вносит значительные изменения в естественный режим рек и гидрологические характеристики потока. Поскольку ледяной покров служит дополнительной поверхностью сопротивления, происходит перераспределение скоростей в потоке.

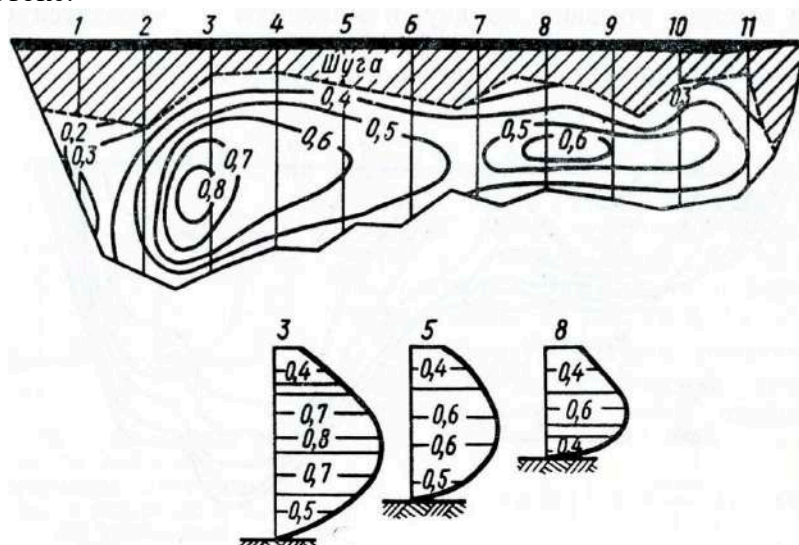


Рис. 11.11. Распределение скоростей в живом сечении при ледоставе.

Определение расхода и скорости течения воды

Расход воды – количество воды, бродящее через поперечное сечение за единицу времени.

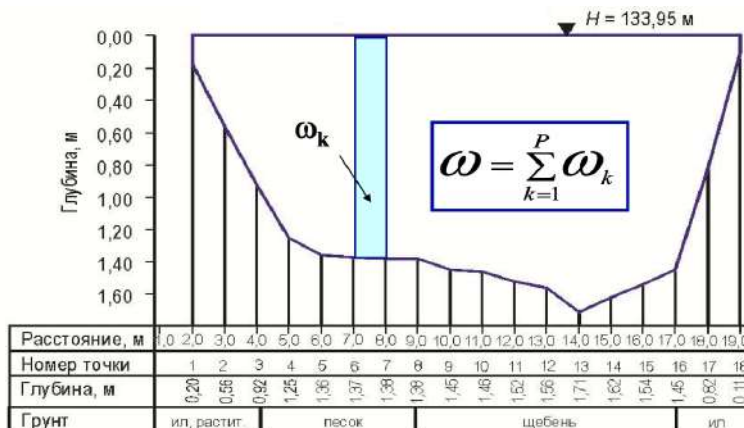


Рис. 11.12. График поперечного профиля русла р. Протвы по данным измерений 1 августа 2005 г.

Частные расходы воды:

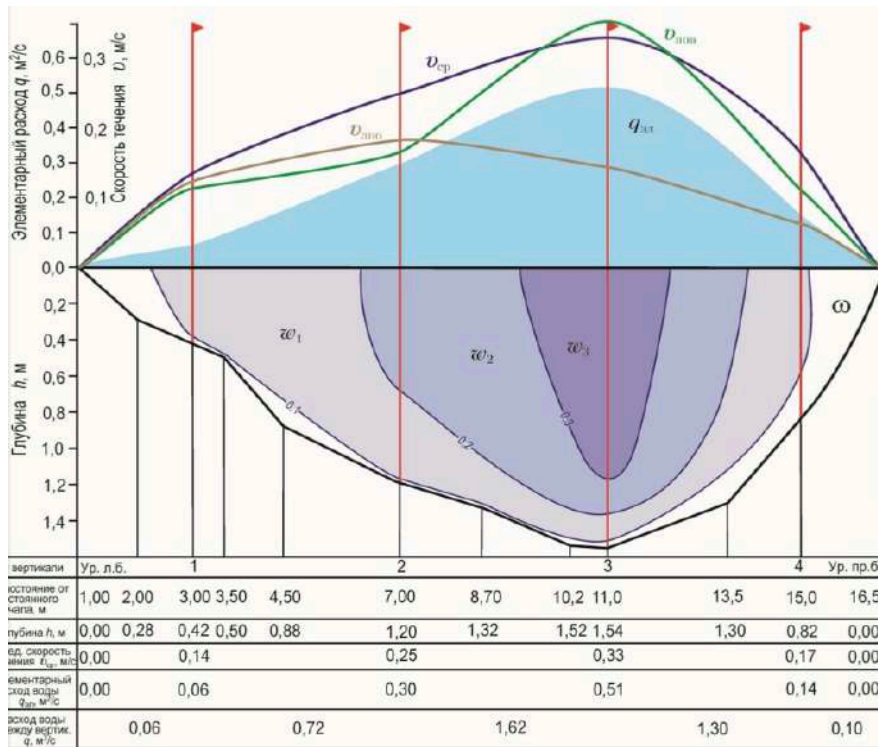
$$q_i = \omega_i v_i \quad (11.1)$$

Общий расход воды:

$$Q = \sum q_i \quad (10.2)$$

Средняя скорость потока:

$$V = \frac{\sum q_i}{\sum \omega_i} \quad (11.3)$$



Эпюры скоростей течения воды на вертикалях

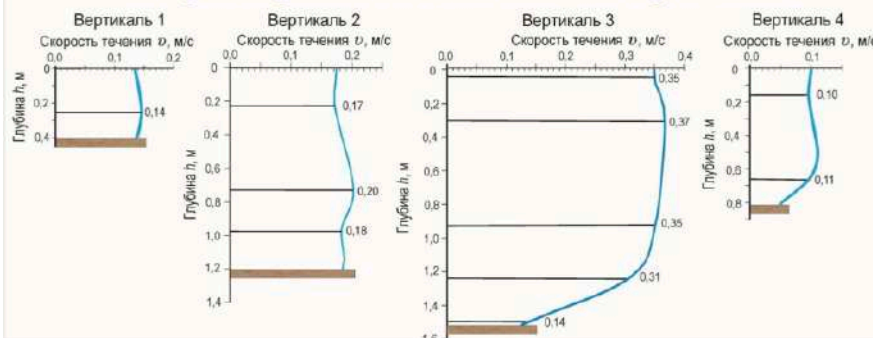


Рис. 11.13. Вычисление расходи воды графическим способом.

$$Q = kv_1\omega_0 + \frac{v_1+v_2}{2}\omega_1 + \dots + \frac{v_{n-1}+v_n}{2}\omega_{n-1} + kv_n\omega_n \quad (11.4)$$

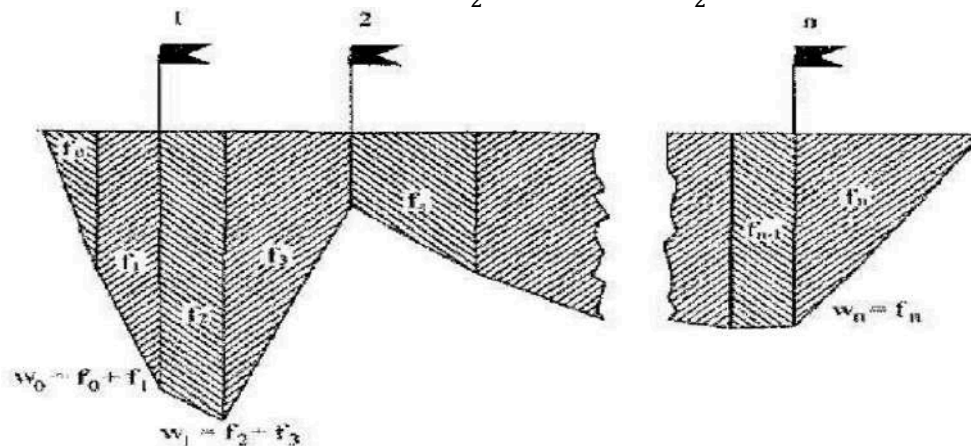


Рис. 11.14. Схема вычисления частичных площадей живого сечения.

Акустический доплеровский профилограф «Rio Grande». Прибор одновременно измеряет скорость и направление течения, глубину водного объекта до твердого грунта, профиль определяет толщину слоя подвижного грунта (наносов), измеряет температуру воды. По результатам измерения автоматически указывается площадь водного сечения и суммарный расход воды. Данные характеристики программа позволяет получить на любой желаемой вертикали исследуемого поперечника.

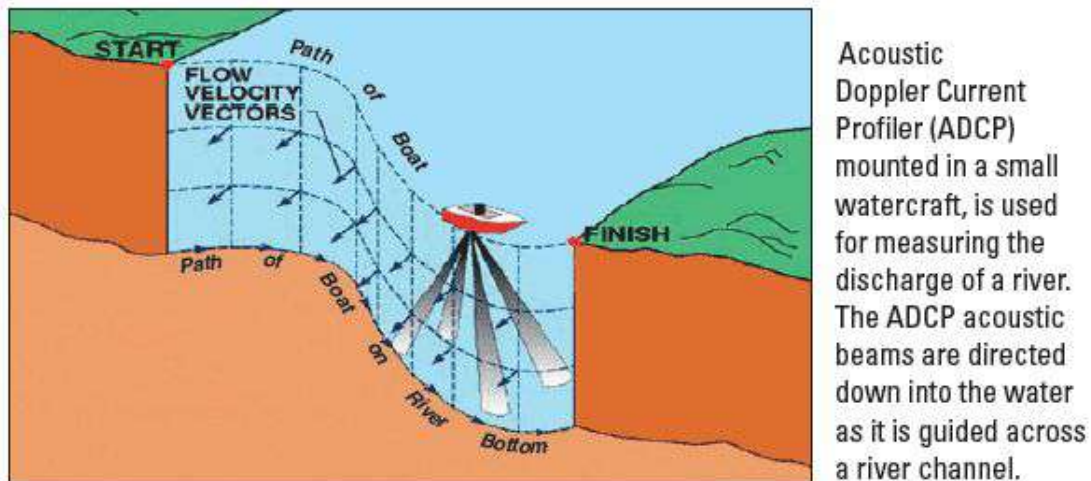


Рис. 11.15. Схема использования акустического доплеровского профилографа.

При измерении используется эффект Доплера – изменение частоты и длины волн, регистрируемых приемником, вызванное движением их источника и/или движением приемника.

Измерение расхода воды с помощью поплавков: запускаемые поплавки способны отследить изменчивость скоростей течения по ширине потока. Поплавки бывают глубинными, но на рис. 11.16. рассматриваются поверхностные, определяющие различные значения поверхностной скорости.

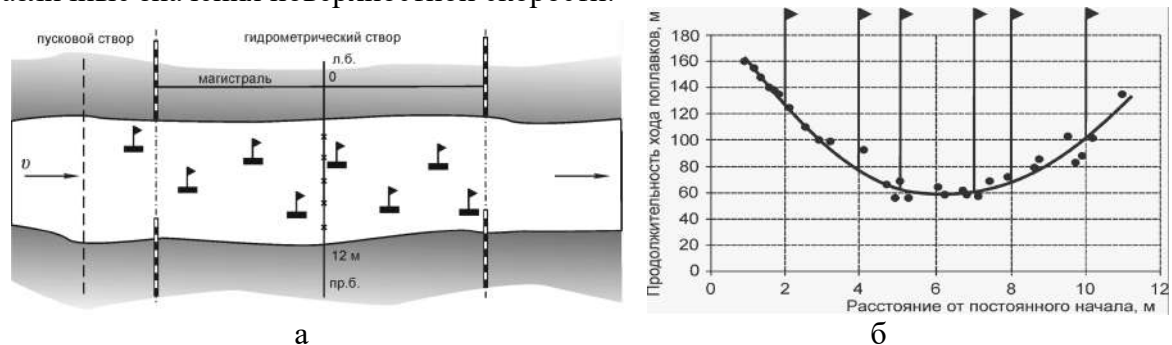


Рис. 11.16. Измерение расхода воды с помощью поплавков (а), продолжительность хода поплавков (б).

Для измерения поверхностных скоростей выбирают прямой участок длиной не менее $L = 50V_{\text{макс}}$. Установив специальные створы и измерив расстояния от одного до другого, поплавки запускаются. Затем определяется время прохождения в разных местах. После осуществляется переход от времени к величине скорости. Поверхностная скорость:

$$V_{\text{п}} = L/t \quad (11.5)$$

Средняя скорость:

$$V_{\text{cp}} = KV_{\text{п}}, \quad (11.6)$$

где K – поправочный коэффициент от поверхностной скорости к средней, приближенно $K = 0,7, \dots, 0,9$.

Измерение расхода воды с помощью водосливов: пусть b – ширина выходной части горловины лотка (м), H – глубина воды над порогом лотка в верхнем бьефе (м). Тогда:

$$Q = 2,14 * b * H, \text{ м}^3/\text{с} \quad (11.7)$$

Определение расхода воды с помощью ионного паводка: есть пусковой створ и створ, где определяется расход воды (расстояние между ними ~100-200 м). Выше по течению производится пуск ионного раствора, например солевой раствор. В измерительном створе наблюдают за изменением концентрации створа или индикатора. Так, допустим, есть исходная концентрация раствора (C_p) объемом V_p . Тогда расход воды:

$$Q = \frac{V_p C_p}{F} \quad (11.8)$$



Рис. 11.17. Определение расхода воды с помощью ионного паводка.

Измерения расхода воды при помощи родаминового паводка: родамин – флуоресцентный раствор (органический краситель. Объем раствора – всего 50 мл. измерение производится с помощью полевого флуориметра).

Расчетные методы определения скорости течения. Формула Шези

Рассматривается некий отсек, взятый из речного потока. Уклон $J = \sin \alpha$. B – ширина русла (м), Δx – длина участка.

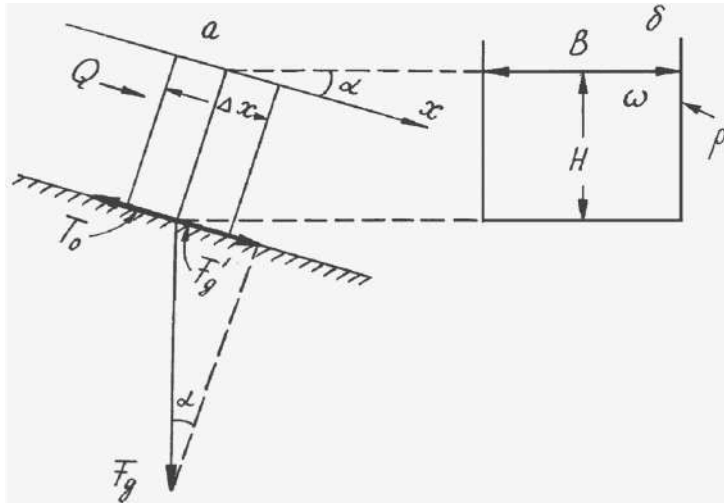


Рис. 11.18. Схема к выводу уравнения квазиравномерного движения руслового потока: продольный разрез (а), поперечный разрез (б).

Пусть m – масса воды в отсеке, равная $\rho\Delta x\omega$, $\frac{dv}{dt}$ – ускорение движения, $\sum F$ – сумма действующих на отсек воды внешних сил (продольная составляющая силы тяжести, равная $F_g = mg \sin \alpha = \rho g \Delta x \omega l$, где l – уклон водной поверхности и противоположно направленная сила трения у дна T_0 , равная $\tau_0 \Delta x p$, где τ_0 – удельное трение (трение на единицу поверхности дна) или т. н. касательное напряжение с размерностью $H/\text{м}^2$, а p – смоченный периметр).

Если принять движение воды квазиравномерным, т. е. близким к равномерному, то $\frac{dv}{dt} \sim 0$, и левая часть уравнения, описывающего второй закон механики, превращается в нуль. В этом случае и $\sum F = 0$.

$$m = \frac{dv}{dt} = \sum F \quad (11.9)$$

$$\sum F = F_g' - T_0 = \rho g \Delta x \omega l - \tau_0 \Delta x p \quad (11.10)$$

$$\sum F = 0: \rho g \Delta x \omega l = \tau_0 \Delta x p \quad (11.11)$$

Для турбулентного движения:

$$\tau_0 = \rho f_{\text{дно}} v^2 \quad (11.12)$$

Обозначим

$$C^2 = \frac{g}{f_{\text{дно}}} \quad (11.13)$$

Динамика речного потока. Формула Шези-Маннинга

$$V = C \sqrt{h l} \quad (11.14)$$

$$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}}, \quad (11.15)$$

где c – коэффициент Шези ($c = 30 - 80 \text{ м}^{0.5}/\text{с}$), n – коэффициент шероховатости ($n = 0,02 - 0,03$), h – глубина потока (м), l – уклон водной поверхности ($l = 0,00003 - 0,001$).

Коэффициент шероховатости речного русла n находят по специальным таблицам. Например, для ровных не заросших русел с песчаным дном $n = 0,020 \div 0,023$, для извилистых русел с неровным дном $n = 0,023 \div 0,033$, для пойм, заросших кустарником, $n = 0,033 \div 0,045$ и т.д.

При заданных расходе воды Q , ширине и шероховатости русла B и n , уклоне дна i_0 , равному уклону водной поверхности I (это справедливо при равномерном движении воды), в потоке сформируется вполне определенная глубина:

$$h_{\text{ср}} = \left(\frac{Qn}{B\sqrt{i_0}} \right)^{3/5} \quad (11.16)$$

- Между Q и h существует строго определенная связь;
- Расход воды является определяющим, и при данных Q и n формируется определенная глубина;
- Если расход постоянен, то есть такие периоды времени в жизни реки, когда при одном и том же значении расхода воды за счет изменения шероховатости происходит изменение уровня или глубины.

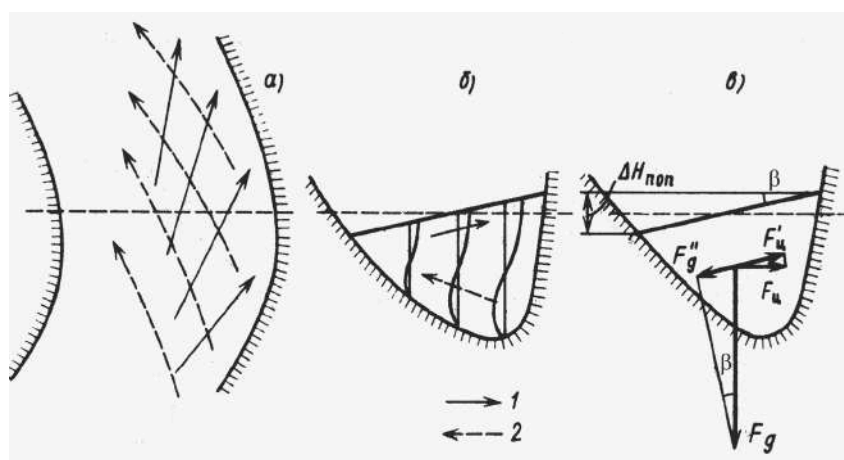


Рис. 11.19. Схема поперечной циркуляции на изгибе речного потока в плане (а), поперечном разрезе (б) и схеме действующих сил (в): поверхностные струи (1), придонные струи (2).

На изгибе речного русла центробежная сила приводит к отклонению течения в поверхностных слоях в сторону вогнутого берега, что создает поперечный перепад уровня воды.

В результате избытка гидростатического давления у вогнутого берега в придонных слоях возникает течение, направленное в сторону выпуклого берега. Складываясь с основным продольным переносом воды в реке, разнонаправленные течения на поверхности и у дна создают спиралевидное движение воды на изгибе речного русла – поперечную циркуляцию.

Лекция 12. Динамика речного потока

Динамика речного потока. Формула Шези-Маннинга (продолжение)

Проекция центробежной силы $F'_ц$ на линию, проходящую через центр тяжести поперечного сечения русла параллельно водной поверхности, будет равна поперечно составляющей силы тяжести F''_g , обусловленной поперечным уклоном.

$$F'_ц = F_ц \cos \beta \quad (12.1)$$

$$F''_g = F'_g \sin \beta = F_g I_{\text{поп}} \quad (12.2)$$

$$I_{\text{поп}} = \sin \beta \quad (12.3)$$

В приведенных выражениях $I_{\text{поп}}$ – поперечный уклон водной поверхности, u – средняя скорость течения, r – радиус изгиба русла, β – угол наклона уровня в поперечном направлении.

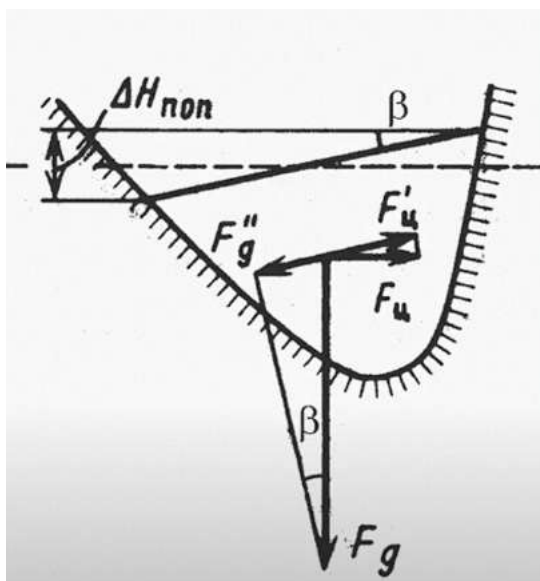


Рис. 12.1. Определение поперечного уклона.

Напомним, что центробежная сила равна

$$F_ц = \frac{mu^2}{r}, \quad (12.4)$$

а сила тяжести:

$$F_g = mg \quad (12.15)$$

Подставляя эти выражения в уравнение $F'_ц = F''_g$, получим

$$\frac{mu^2 \cos \beta}{r} = mg I_{\text{поп}} \quad (12.6)$$

Считая, что при очень малой величине угла β , $\cos \beta \sim 1$, решим полученное уравнение относительно $I_{\text{поп}}$:

$$I_{\text{поп}} = \frac{v^2}{gr} \quad (12.7)$$

Перекося водной поверхности:

$$\Delta H = B I_{\text{поп}}, \quad (12.8)$$

где B – ширина русла.

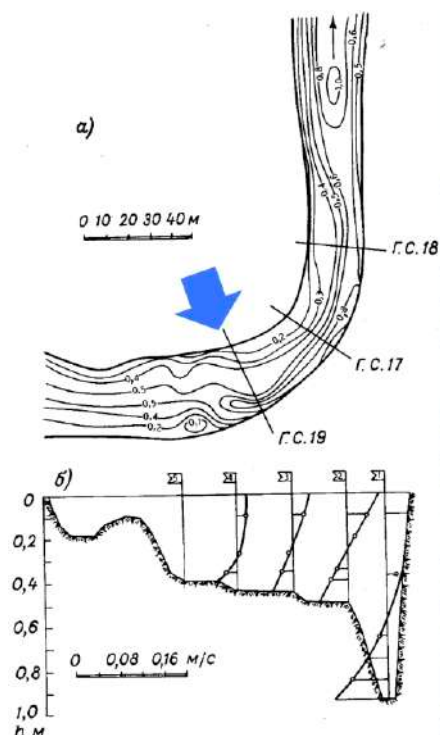


Рис. 12.2. План изгиба р. Снов (а) и эюры поперечных скоростей (б) на гидростворе №19.

Характеристики речных наносов

Речные наносы – твердые частицы, образующиеся в результате эрозии водосборов и русел водотоков, а также абразии водоемов, переносимые водотоками, течениями в озерах и водохранилищах и формирующие их ложе. Минеральные частицы на дне реки – русловые отложения.

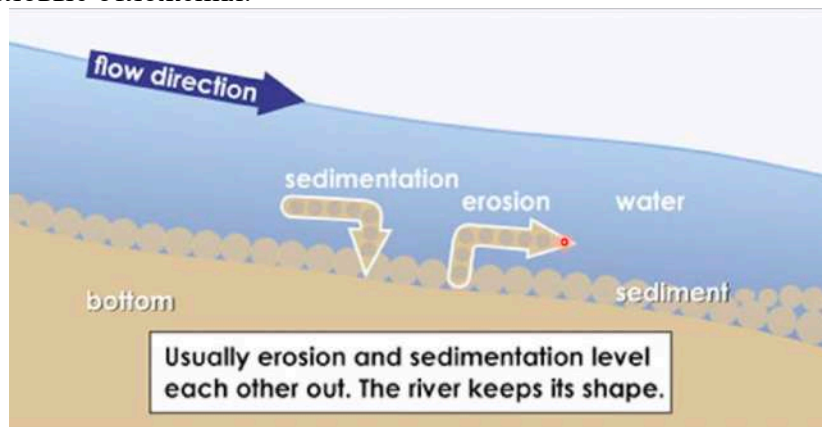


Рис. 12.3. Эрозия и аккумуляция.



Рис. 12.4. Причины изменения стока наносов.

Формирование стока взвешенных наносов:

- Является результатом процессов на поверхности речного бассейна (оползни, осыпания, смыв почвы, овражная эрозия, извержения вулканов и др.);
- Определяется взаимодействием водного потока и русловых отложений.



Рис. 12.5. Факторы формирования стока наносов.

Структура речных наносов:

- Взвешенные наносы: перемещаются совместно с водой;
- Влекомые наносы: перемещаются по дну.

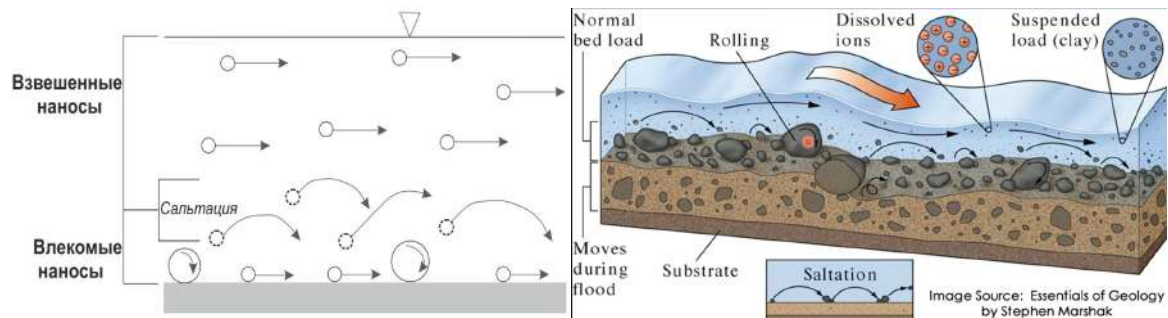


Рис. 12.6. Структура речных наносов.

Характеристики речных наносов:

- Диаметр взвешенных наносов d_v (мм) и русловых отложений $d_{от}$ (мм);
- Плотность частиц ρ_n (кг/м³) и отложений ρ_0 (кг/м³);
- Гидравлическая крупность частиц – скорость осаждения частиц в неподвижной воде w (м/с);
- Мутность воды s (кг/м³);
- Расход взвешенных (R) и влекомых (G) наносов (кг/с).

Фракции минеральных частиц:

Фракция	d , мм	Речные наносы
Валуны	>100	Влекомые
Галька	100-10	Влекомые
Гравий	10-1	Влекомые
Песок	1-0,1	Влекомые, взвешенные
Пыль	0,1-0,01	Взвешенные
Ил	0,01-0,001	Взвешенные
Глина	<0,001	Взвешенные

С увеличением размера частиц уменьшается их скорость осаждения в воде.

Плотность частиц ρ_n и отложений ρ_0 :

Фракции	ρ_n , кг/м ³	ρ_0 , кг/м ³
Галька		2000-2100
Гравий		1800-2100
Песок	2650	1500-1800
Пыль		1100-1500
Ил		700-1100

Режимы осаждения взвешенных частиц:

- Ламинарный ($d < 0,15$ мм), $w \sim gd^2$;
- Переходный ($0,15 < d < 1,5$ мм);
- Турбулентный ($d < 1,5$ мм), $w \sim (gd)^{0,5}$.

Условие переноса взвешенных частиц:

$$u_z^+ > w, \quad (12.9)$$

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

Мутность

Мутность – концентрация (содержание) наносов в потоке ($s, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$):

$$s = \frac{m}{V} \quad (12.10)$$

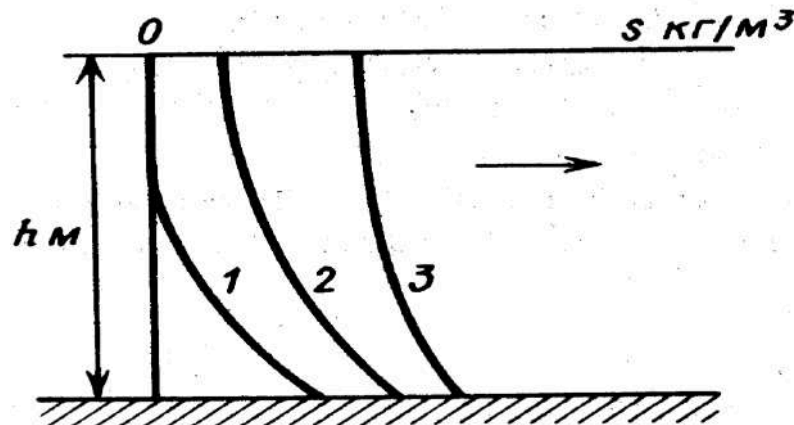


Рис. 12.7. Распределение мутности s (по глубине потока h) для крупных (1), средних (2) и мелких (3) фракций.

Современные методы определения мутности воды:

1. Прямые ($S_{\text{пр}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$):

- Гравиметрический;

2. Косвенные ($S_{\text{кос}}$, НТУ, дБ, яркость и др.):

- Оптический (фотометрический) – основан на способности взвешенных частиц рассеивать свет, проходящий через пробу воды: чем сильнее он затухает, тем больше содержание в воде взвешенных частиц. Таким образом получают «оптическую мутность» T (= turbidity);

$$S = f(T) \quad (12.11)$$

- Дистанционный;

- Акустический: доплеровские измерители скоростей течения можно использовать и для определения мутности воды. Измерение основано на излучении акустического импульса в воду, а затем «фиксации эха», обусловленного наличием в воде взвешенных частиц;

- Лазерный.

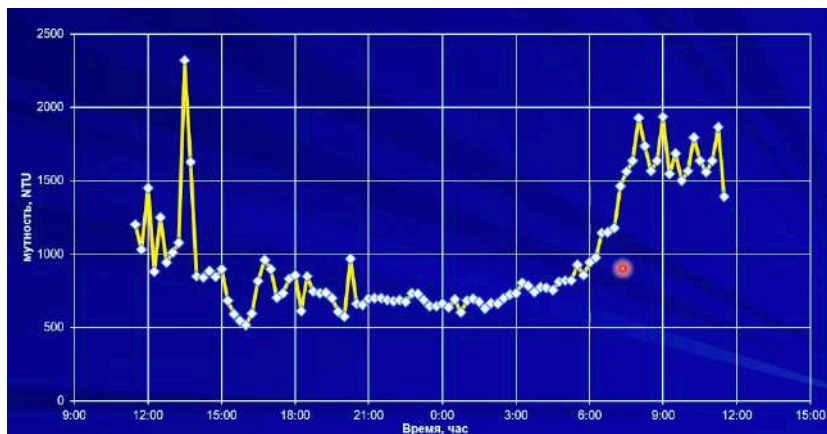


Рис. 12.8. Временная изменчивость мутности воды. Изменение мутности воды в ручье за 22-23 июля 2014 г. (Тарфала, Швеция).

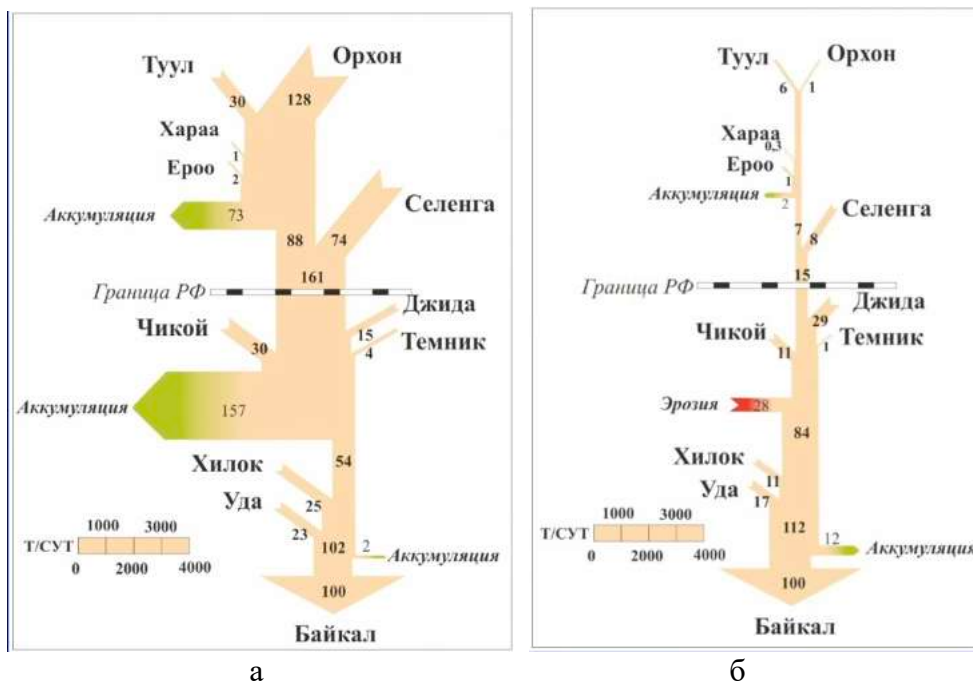


Рис. 12.9. Изменение расхода взвешенных наносов в бассейне Селенги в паводочный период года (а) и в межень (б) в абсолютных значениях.

Факторы изменения мутности:

- Зональное изменение осадков;
- Литология подстилающих грунтов;
- Почвенные и растительные факторы эрозии;
- Орoграфические особенности техногенные нагрузки.

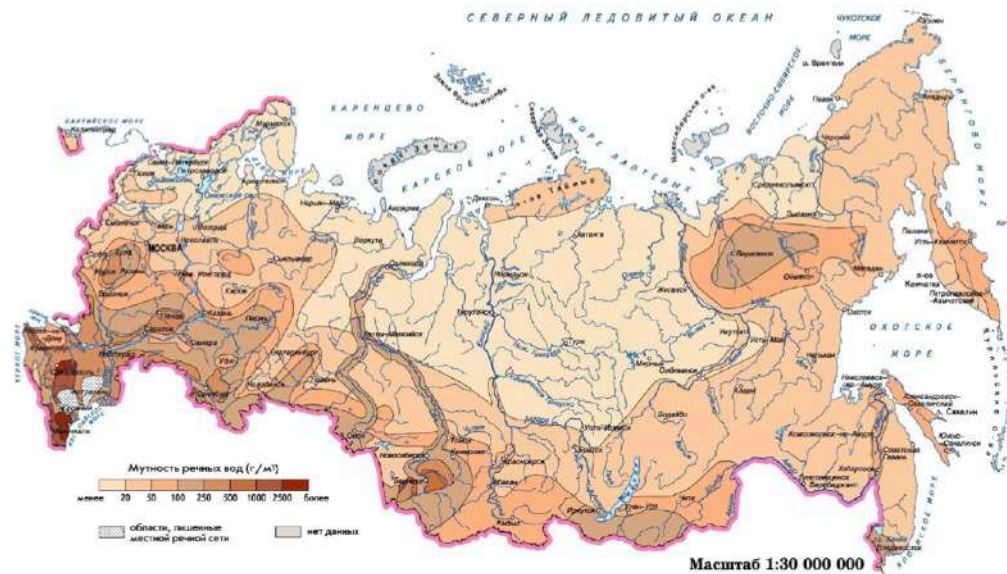


Рис. 12.10. Карта мутности речных вод.

Пределные величины мутности и расхода взвешенных частиц:

- Мутность (кг/м^3) потока s и предельная нагрузка потока взвешенными частицами $s_{\text{тр}}$ (кг/м^3);
- Расход взвешенных наносов R и транспортирующая способность потока $R_{\text{тр}}$ ($R_{\text{тр}} = Q \cdot s_{\text{тр}}$);

Характеристики годового стока взвешенных наносов:

- Сток наносов;

$$W_R = RT = 31,5 \cdot 10^6 R [\text{кг}] = 31,5 R [\text{тыс. т}] = 31,5 \cdot 10^3 R [\text{млн. т}] \quad (12.12)$$

- Модуль стока наносов.

$$M_R [\text{т/км}^2] = 31,5 \cdot \frac{10^3 R}{F}, \quad (12.13)$$

R – расход взвешенных наносов (кг/с), F – площадь водосбора (км^2).

Изменение модуля стока взвешенных наносов по территории:

Регион	Модуль стока взвешенных наносов, т/ км ²
Север ЕТР	1-2
Север и запад Русской равнины	10-20
Юг СНГ	50-100
Бассейн Терека	300
Бассейн Хуанхэ	1590

Сток речных наносов



Рис. 12.11. Сток речных наносов.

Существенный вклад в мировой сток взвешенных наносов (млрд. т) дают следующие реки:

- Амазонка (1,2);
- Хуанхэ (1,185);
- Ганг и Брахмапутра (1,06);
- Янцзы (0,471);
- Миссисипи (0,4).

Реки мира приносят в океан около 15-22 млрд. тонн наносов.

Формы движения влекомых наносов:

- Перекатывание;
- Скольжение;
- Сальтация;
- Движение гряд.

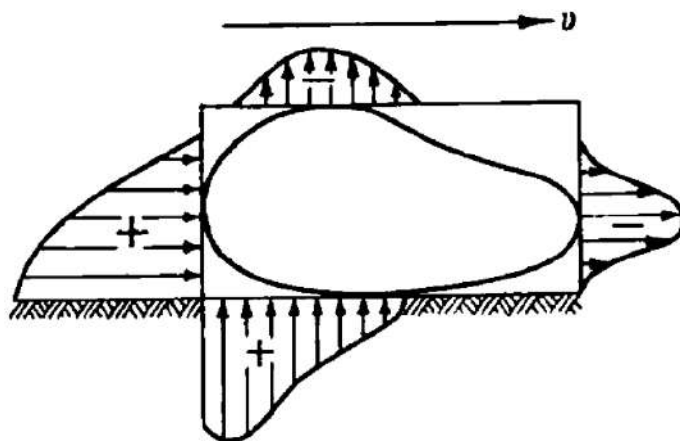


Рис. 12.12. Схема распределения давления вокруг частицы, лежащей на дне.

В направлении, параллельном дну, на частицу действуют две силы: сила лобового давления текущей воды, стремящаяся сдвинуть частицу и пропорциональная квадрату придонной скорости течения и площади сечения частицы (а), и противоположно направленная сила трения, удерживающая частицу на дне (б).

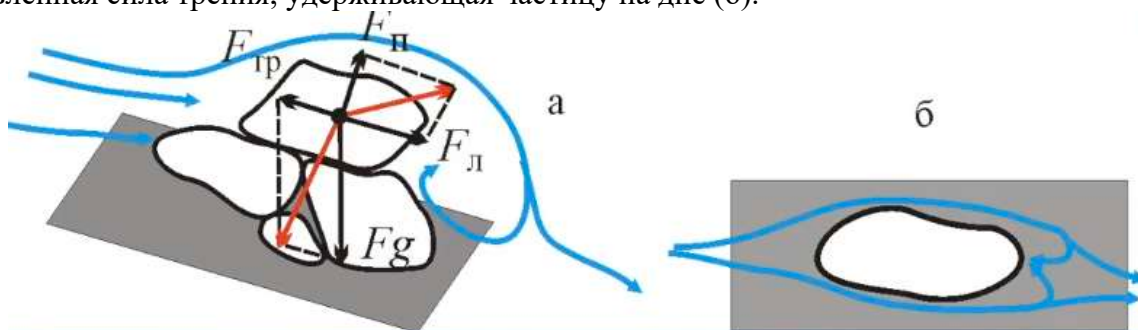


Рис. 12.13. Баланс сил, действующих на частицу, лежащую на дне.

Последняя сила пропорциональна весу частицы в воде за вычетом т. н. подъемной силы и зависит от коэффициента трения, характеризующего степень сцепления частицы с дном, т. е. другими частицами. Анализ баланса перечисленных сил приводит к выражению для т. н. «начальной скорости», при которой частица на дне теряет свою устойчивость:

$$u_n = a\sqrt{dg}, \quad (12.14)$$

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

Условия поведения частиц на дне реки:

- Превышение критической (начальной, неразмывающей) скорости потока

$$u > u_n \quad (12.15)$$

- Величина u_n зависит от диаметра русловых отложений d ;
- Закон Эри: вес влекомых частиц пропорционален шестой скорости потока.

$$P \sim u^6 \quad (12.16)$$

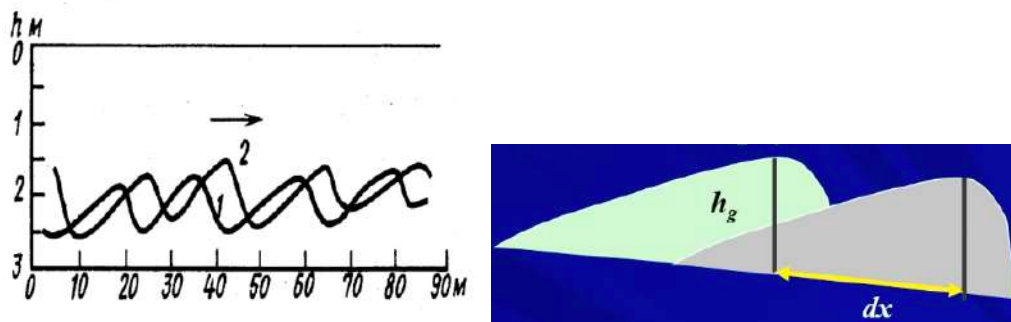


Рис. 12.14. Оценка расхода влекомых наносов (кг/сут) по смещению гряд: 1,2 – смежные моменты времени двух гряд, $t_2 - t_1 = dt$.

Скорость перемещения гряды:

$$C_g = \frac{dc}{dt}, \text{ м/сут} \quad (12.17)$$

Расход влекомых наносов:

$$G = 0,6Dp_0h_gC_g, \quad (12.18)$$

где B – ширина русла, p_0 – плотность отложений.

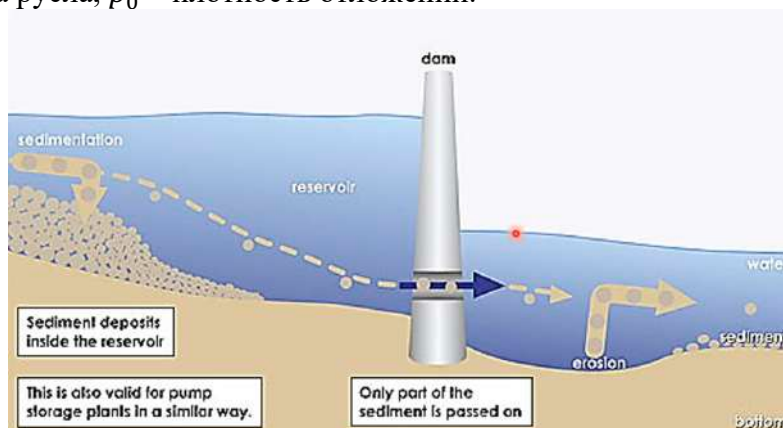


Рис. 12.15. Влияние водохранилищ на сток наносов.



Рис. 12.16. Многолетняя динамика среднегодового поступления взвешенных наносов в океан Хуанхэ в Желтое море, полученная по результатам анализа аккумулятивных толщ

дельты и устьевого взморья (до 1950 г.), а также по данным мониторинга характеристик стока наносов на посту провинции Лицзинь в период с 1950 г. по 2005 г. [Wang, 2007].

Антропогенные факторы, определяющие сток наносов:

- Вырубка лесов, осушение болот: увеличение стока наносов;
- Урбанизация и строительство дорог: увеличение стока наносов в результате строительных работ, снижение стока наносов за счет асфальтирования;
- Разработка горнорудных месторождений: многократное увеличение мутности воды за счет мелких фракций;
- Распашка земель и орошение: увеличение стока наносов;
- Выпас скота: увеличение стока наносов;
- Строительство водохранилищ: большое поступление наносов при заполнении водохранилищ, задержание наносов водохранилищами.

Сели

Сель – мощные грязевой, грязекаменный или водокаменный поток, внезапно возникающих в руслах горных рек вследствие резкого паводка, вызванного интенсивными ливнями, бурным снеготаянием и другими причинами.

Причины возникновения селя:

- Интенсивные и продолжительные ливни;
- Бурное таяние ледников или сезонного снегового покрова;
- Прорыв завальных озер;
- Обрушение в русло больших количеств рыхлообломочного материала (при больших уклонах местности);
- Сейсмический удар;
- Извержение вулкана;
- Удар от обрушения ледника;
- Камнепад;
- Техногенная деятельность (взрыв при проведении горных работ, сведение лесов, неумеренный выпас скота, создание отвалов горных пород).

Сели можно классифицировать по:

1. Характеру движения твердой фазы:
 - Эрозионные;

- Обвально-оползневые;
2. Гранулометрическому составу и плотности рыхлообломочного материала:
- Грязевые (частицы размером более 2 мм менее 10%) – смесь воды с мелкоземом при небольшой концентрации камней, плотность 1,5-2 т/м³;
 - Грязекаменные – смесь воды, гальки, гравия, небольших камней, плотность 2,1-2,5 т/м³: дресвяные (гальки и валунов менее 10%), галечниковые (гальки и гравия более 10%, но валунов менее 10%);
 - Водокаменные (валунные) – смесь воды с преимущественно крупными камнями, плотность 1,1-1,5 т/м³ (валунов и глыб более 10%);
3. Физическому типу:
- Связные сели
 - Несвязные сели
4. Суммарному объему селевого выноса:
- Маломощный (10 000 м³);
 - Среднемощные (20 000 – 100 000 м³);
 - Мощный (100 000 – 900 000 м³);
 - Катастрофический (более 1 000 000 м³).

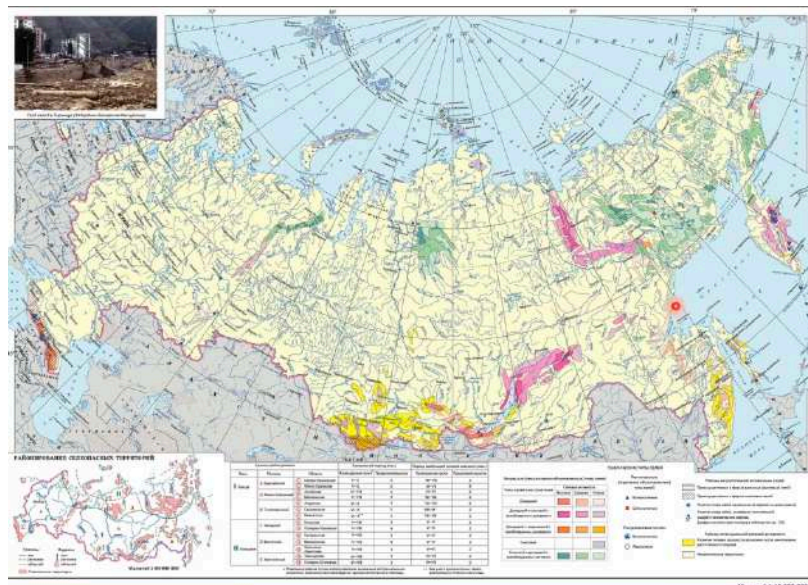


Рис. 12.17. Сели в России.

Лекция 13. Русловые процессы и их типы

Русловые процессы. Русловые деформации

Русловые процессы – морфологические изменения русла водотока и поймы под действием текущей воды.



Рис. 13.1. Двойственная природа русловых процессов.

Русловые деформации – конкретные проявления русловых процессов в виде изменения положения и размеров русла, поймы и отдельных русловых образований, т. е. в виде размыва или намыва дна и берегов.



Рис. 13.2. Русловые деформации.

Типизация русловых деформаций:

- Обратимые (периодические, знакопеременные) – изменения русла, которые неоднократно повторяются и после которых русло возвращается приблизительно в первоначальное положение. Это русловые деформации при движении донных гряд, развитии излучин и т. д.;

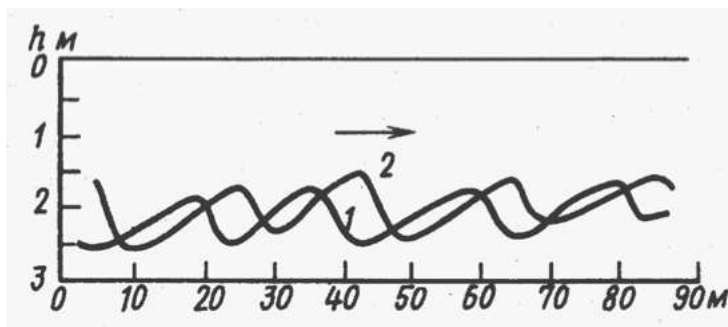


Рис. 13.3. Пример обратимых русловых деформаций.

- Направленные (необратимые) – односторонние изменения русла, например, при однонаправленном размыве или намыве, сопутствующих сооружению водохранилища на реке.

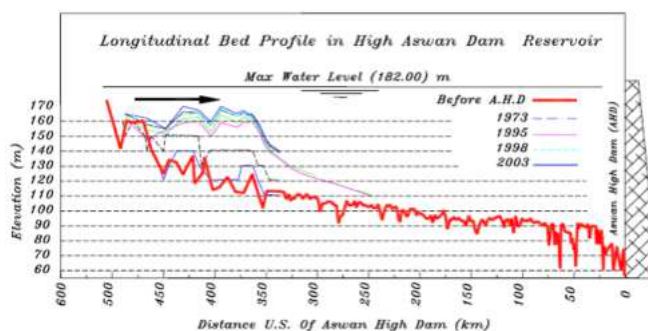


Fig (37) Longitudinal Bed Profile in AHD Reservoir

Рис. 13.4. Пример направленных русловых деформаций.

Русловые деформации также бывают вертикальные (размыв берегов, изменение продольного профиля) и горизонтальные (смещение отдельных форм рельефа).



Рис. 13.5. Русловые деформации: вертикальные (а) и горизонтальные (б).

Продольный профиль рек – причины деформации:

- Тектоника и денудация
- Местный и общий базис эрозии

- Удлинение реки или ее спрямление.

$$I_0 = KQ^x s^y D^z, \quad (13.1)$$

где Q – средний многолетний расход воды, s – мутность, D – средняя крупность наносов, лежащих на дне, $x \sim -\frac{1}{9}$, $y \sim \frac{2}{3}$, $z \sim \frac{1}{18}$.

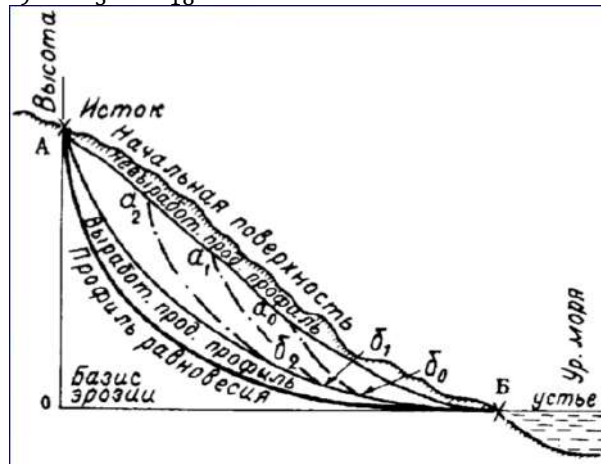


Рис. 13.6. Форма продольного профиля.

Прямые факторы деформаций продольного профиля дна:

- Изменение стока взвешенных и влекомых наносов $R + G$;
- Изменение $R_{тр}$.

$R + G > R_{тр} \Rightarrow$ аккумуляция наносов и повышение отметок дна

$R + G < R_{тр}$

\Rightarrow размыв поверхности русловых отложений и понижение отметок дна

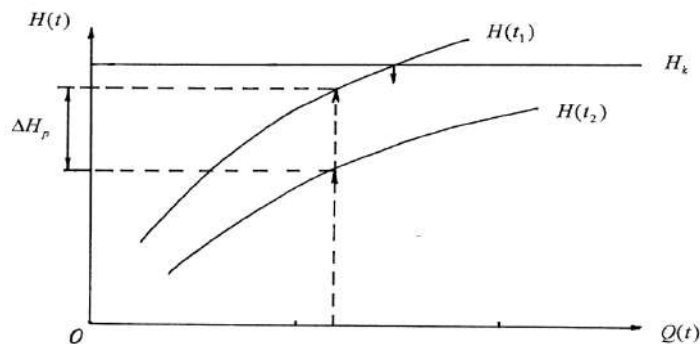
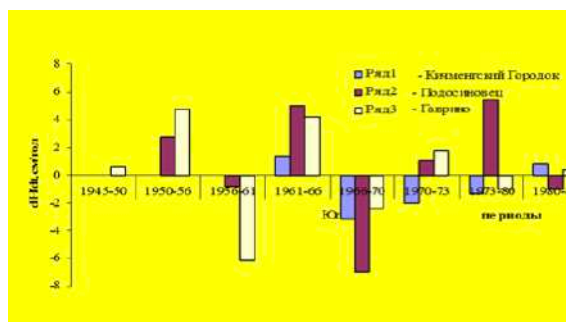
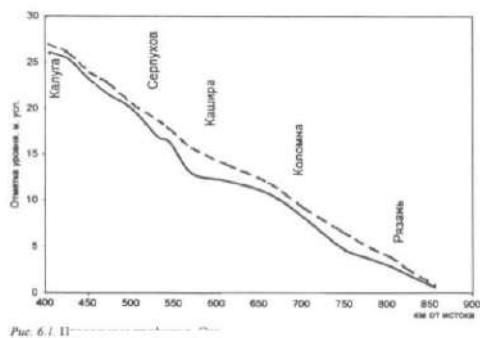


Рис. 13.7. Схема определения местных вертикальных деформаций русла.

Типы вертикальных деформаций продольного профиля дна:

- Направленные (необратимые);
- Периодические (циклические).



а

б

Рис. 13.8. Направленные деформации русла р. Ока, 2002 (а), периодические деформации русла р. Юг (б).

Меандрирование речного русла

Продольное и поперечное смещение излучин – горизонтальные деформации русла.

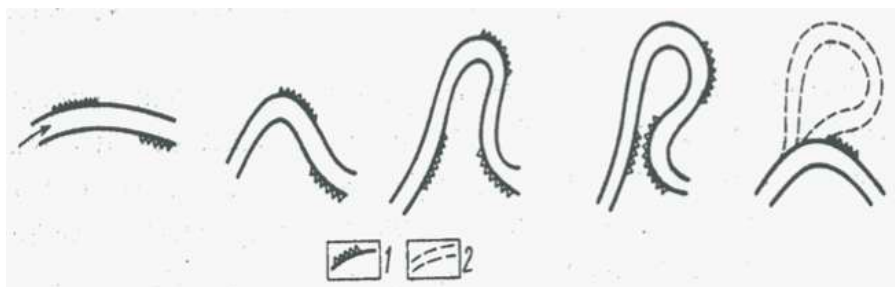


Рис. 13.9. Схема смещения и изменения формы излучины: участок размыва берега (1), старица (2).



Рис. 13.10. Формирование стариц.

Размеры речных излучин:

- Макроизлучины;
- Излучины;
- Вторичные изгибы русла.

Русловые формы рельефа: русловые образования, подвергающиеся деформациям, – это скопления наносов, создающие характерные формы рельефа речного русла и поймы разного размера – микро-, мезо- и макроформы.

К микроформам относятся перемещающиеся в русле донные гряды, размеры которых меньше глубины русла.

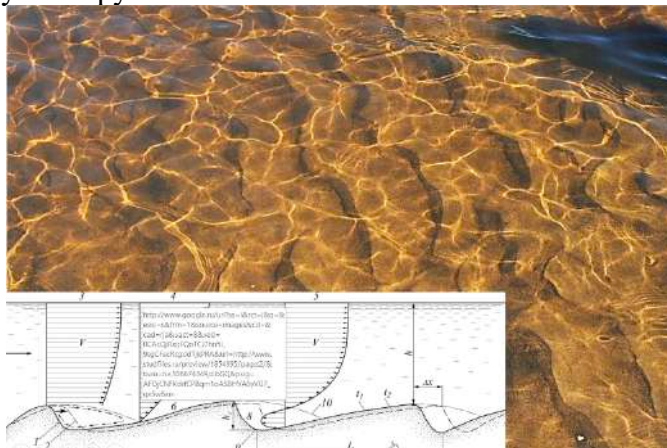


Рис. 13.11. Микроформы: рифели.

Мезоформы – это также состоящие из наносов гряды, но более крупного размера, соизмеримые уже с поперечными размерами самого русла.

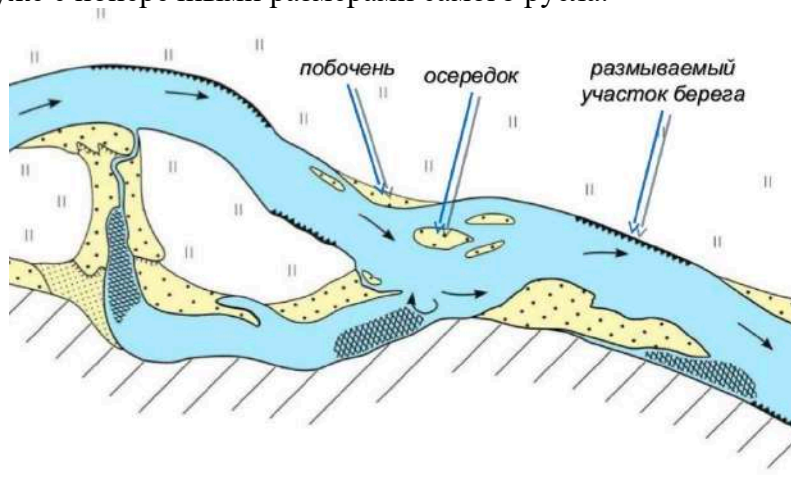


Рис. 13.12. Мезоформы: речные перекаты, осередки, небольшие острова.

К мезоформам относятся речные перекаты, осередки, небольшие острова. Макроформами называют крупные, морфологически однородные участки речного русла, представленные относительно прямолинейными участками, извилинами (излучинами, меандрами), системами русловых и пойменных разветвлений, участками т. н. разбросанного русла.



Рис. 13.13. Мезоформы: речные перекаты (а), побочни и осередки (б).

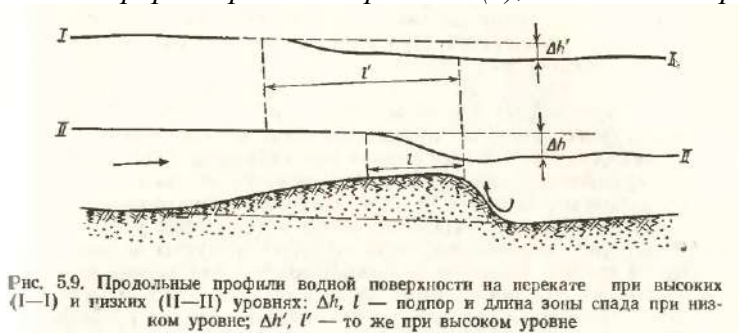
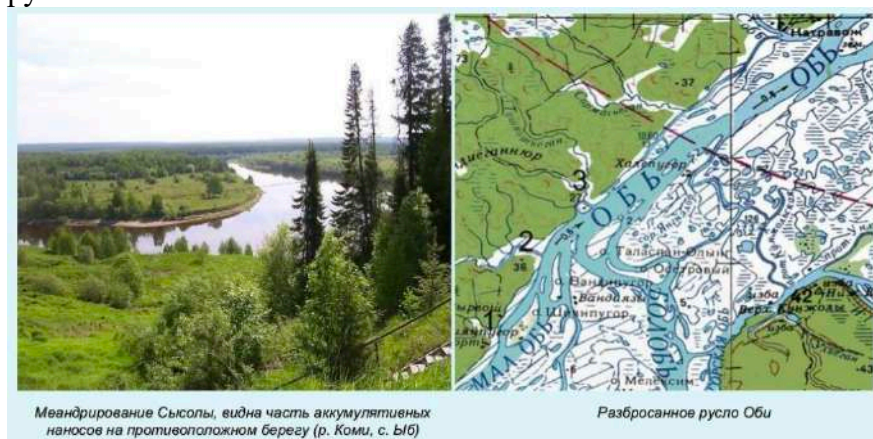


Рис. 5.9. Продольные профили водной поверхности на перекате при высоких (I—I) и низких (II—II) уровнях; Δh , l — подпор и длина зоны спада при низком уровне; $\Delta h'$, l' — то же при высоком уровне

Рис. 13.14. Сезонные деформации перекатов.

Макроформы – крупные, морфологически однородные участки речного русла, представленные относительно прямолинейными участками, извилинами (излучинами, меандрами), системами русловых и пойменных разветвлений, участками т. н. разбросанного русла.



Меандрирование Сысоли, видна часть аккумулятивных наносов на противоположном берегу (р. Коми, с. Ыб)

Разбросанное русло Оби

Рис. 13.15. Макроформы: примеры.

Морфодинамические типы речных русел:

- Прямолинейные;
- Меандрирующие (извилистые);
- Разветвленные на рукава.

Виды (устойчивости) неустойчивости системы поток-русло. Устойчивость:

- Частиц;
- Русловых форм;
- Участка реки;
- Продольного профиля реки.

Устойчивость речного русла, т. е. степень его противодействия размыву, тем больше, чем меньше скорости течения и меньше размывающая способность потока и чем больше сопротивляемость русла размыву, которая определяется крупностью наносов, формирующих дно, связанностью наносов, слагающих берега, закрепляющим влиянием растительности на берегах, искусственными защитными мероприятиями и т. д.

Количественная оценка устойчивости русла:

- Число Лохтина;

$$L = \frac{d}{\Delta H}, \quad (13.2)$$

где d – средний диаметр частиц, ΔH – падение уровня по длине реки (м/км).

- Коэффициент стабильности Н. И. Маккавеева;

$$K_{ст} = \frac{d}{JB}, \quad (13.3)$$

где J – уклон, B – ширина реки.

- Коэффициент устойчивости М. А. Великанова.

$$K_y = \frac{gd}{v^2}, \quad (13.4)$$

где v – средняя скорость потока.

Соответствие устойчивости русла (УР) и числа Лохтина (Л):

Л	Степень УР
> 10-15	Устойчивы
5-10	Относительно устойчивы
2-5	Слабо устойчивы
< 2	Неустойчивы

Практическое значение теории русловых процессов:

- Безопасность промышленных и социальных объектов на берегах рек;
- Условия судоходства;
- Переходы через реки различных коммуникаций;
- Формирование поймы или ее разрушение.

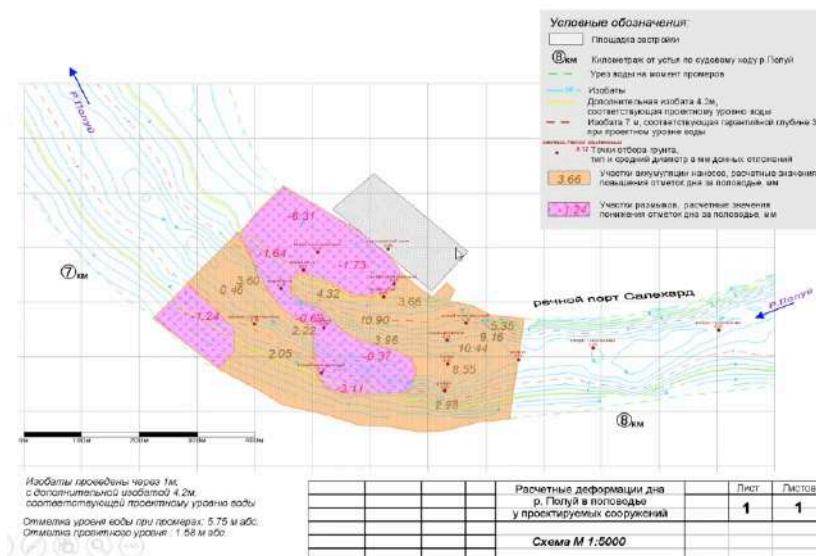


Рис. 13.16. Исследование русловых процессов при проектировании гидротехнических сооружений.

Термический режим рек – пространственно-временные изменения теплового состояния водотоков.

Температура воды – главная характеристика теплового состояния рек.

Изменение потоков теплоты и внутренней энергии водного объекта

Рассмотрим участок русла реки в виде некоторого объекта (рис. 13.17), тепловые потоки, происходящие на поверхности вода-атмосфера, вода-дно, и что под этими потоками подразумевается.

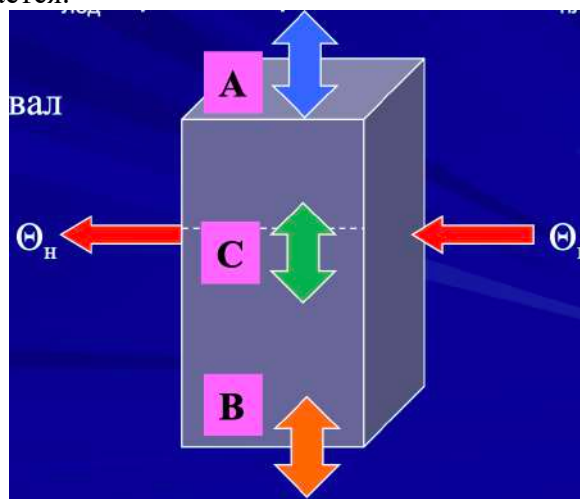


Рис. 13.17. Графическое изображение рассматриваемого случая.

- Θ_B – теплота, поступающая вместе с речной водой через верхний раствор;
- Θ_H – теплота, уходящая с речной водой через нижний створ;
- A – сумма всех компонентов теплообмена через границу «поверхность реки-воздух»;

$$A = R \pm \Theta_{\text{атм}} + \Theta_x + \Theta_{\text{конд}} - \Theta_{\text{исп}} \quad (13.5)$$

- B – сумма всех компонентов теплообмена через границу «вода-грунт»: приток или отток теплоты с грунтовыми водами Θ_{w+} и Θ_{w-} , приход или расход теплоты в процессе теплообмена с грунтами $\Theta_{гр+}$ и $\Theta_{гр-}$;
- C – слагаемые, связанные с тепловыми процессами в самом потоке (теплота, получаемая при переходе части кинетической энергии в тепловую, т. е. при диссипации энергии $\Theta_{\text{дис}}$, приход теплоты при ледообразовании $\Theta_{\text{лед}}$ и расход при таянии льда $\Theta_{\text{пл}}$).

$$\Delta\Theta = \Theta_B - \Theta_H + A + B + C, \quad (13.6)$$

где $\Delta\Theta$ – изменение количества теплоты в воде за интервал времени Δt .

$$\Delta T = \frac{\Theta_B - \Theta_H + A + D + C}{c_p \rho V}, \quad (13.7)$$

где v – объем воды (м^3), C_p – теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$), ΔT – изменение температуры ($^\circ\text{C}$), ρ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Причины изменения теплового состояния рек

- Радиационный баланс;
- Теплообмен с атмосферой;
- Разгрузка подземных вод;
- Теплообмен с дном;
- Фазовые переходы;
- Сброс подогретых вод;
- Регулирование стока.

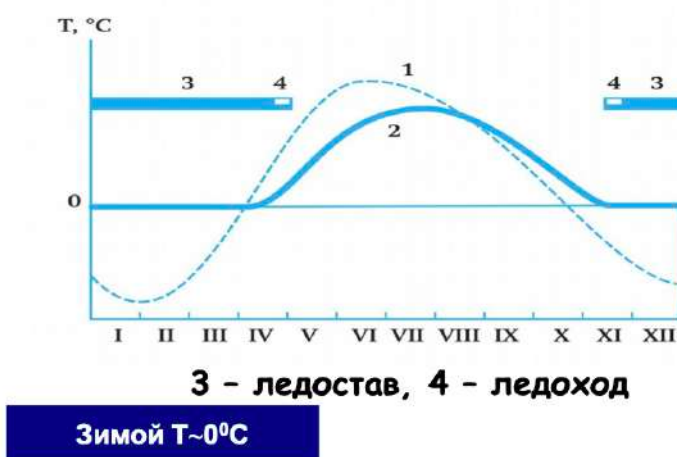


Рис. 13. 18. Характерное изменение температуры воздуха (1) и воды (2) на реках центра ЕТР.

Количество теплоты, переносимой речными водами за какой-либо интервал времени, называется тепловым стоком.

$$W_T = C_p \rho T W \quad (13.8)$$

$$W = Q_0 \Delta t, \quad W_T = F(T, Q_0), \quad (13.9)$$

где W_T – тепловой сток (Дж) за интервал времени Δt , C_p – удельная теплоемкость воды, ρ – ее плотность, T – средняя температура воды, W – сток воды (в м³) за тот же интервал времени Δt (Q_0 – расход воды).

Лекция 14. Гидрохимический режим рек

Минерализация речных вод

- Малая ($c < 200$ мг/л);
- Средняя ($c < 200$ мг/л);
- Повышенная ($c < 200$ мг/л);
- Высокая ($c < 200$ мг/л).

К факторам, определяющим изменение минерализации речных, относятся:

- Зональное соотношение источников питания;
- Геохимия водовмещающих пород подземного бассейна;
- Сезонные изменения составляющих водного баланса реки.

Изменение минерализации несет широтный характер:

- Зона избыточного увлажнения ($c < 200$ мг/л);
- Зона достаточного увлажнения ($c = 200-500$ мг/л);
- Зона недостаточного увлажнения ($c > 500$ мг/л);

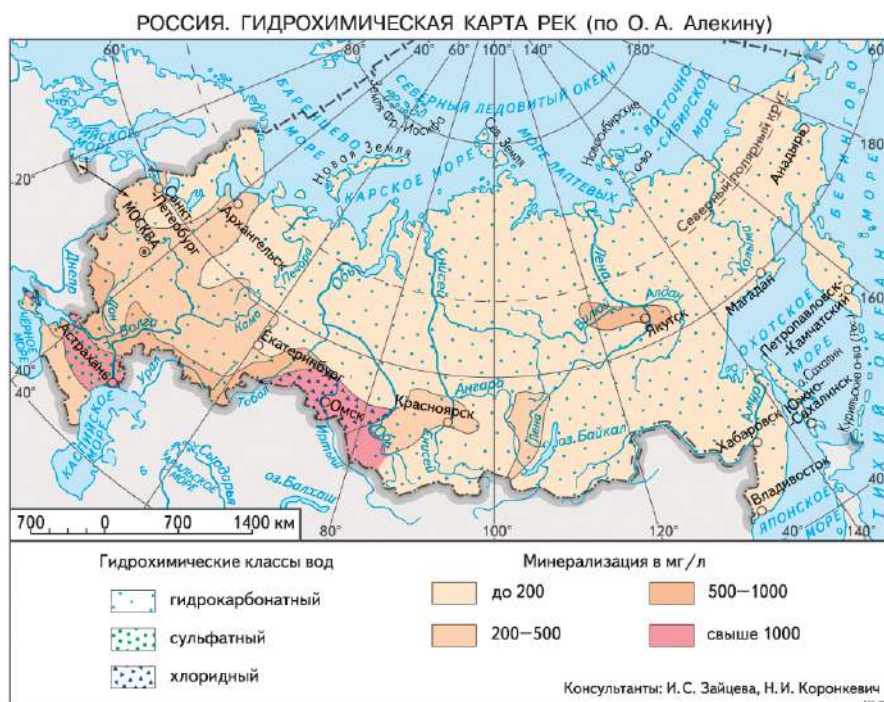


Рис. 14.1. Гидрохимическая карта рек.

Величина минерализации для сибирских рек России величина минерализации относительно невелика (рис. 14.2).

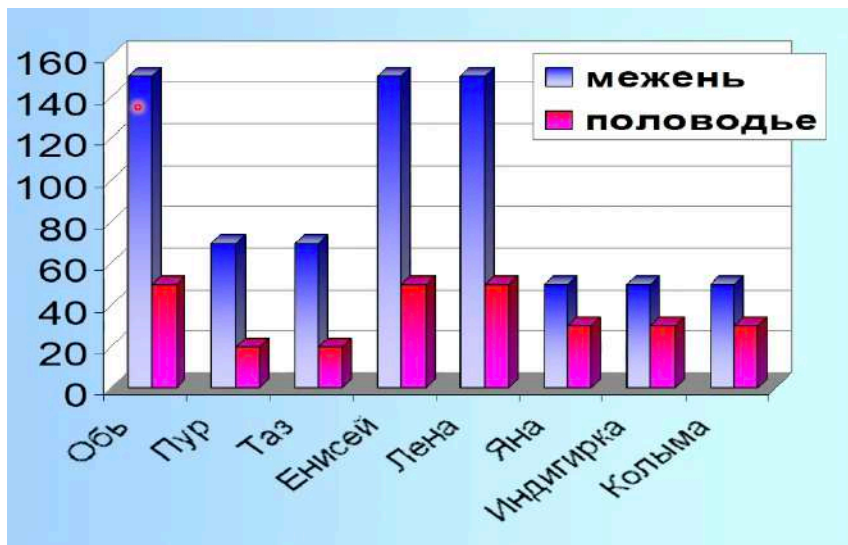


Рис. 14.2. Минерализация крупнейших рек азиатской части России.

На рис. 14.4 изображено распределение минерализации для периода низкого стока. Районы, где она превышает 500 мг/л, в основном расположены в южной области.



Рис. 14.3. Распределение меженной минерализации (мг/л) в пределах европейской части СНГ.

Помимо стоков воды, теплоты и пр. также есть понятие стока растворенных веществ (рис. 14.4) – это важнейшая геохимическая характеристика, отражающая сложные денудационные процесс на водосборе реки.



Рис. 14.4. Структура стока растворенных веществ.

Характеристики стока:

- Расход растворенных веществ;

$$R_{рв} [\text{кг/с}] = Q [\text{м}^3/\text{с}] * c [\text{кг/м}^3] \quad (14.1)$$

- Сток растворенных веществ (ионный сток).

$$W_{рв} [\text{кг}] = 31,5 * 10^6 R_{рв} \quad (14.2)$$

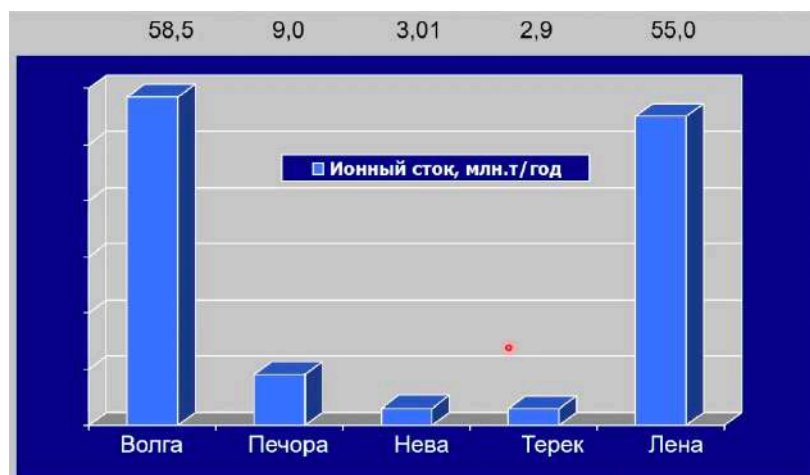
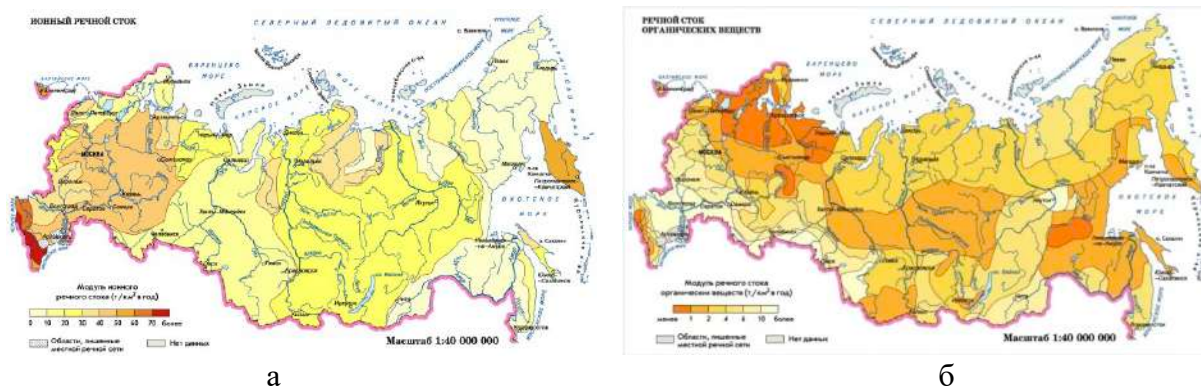


Рис. 14.5. Природное изменение ионного стока.

Все реки земного шара в целом дают 3,81 млрд. т/год ионного стока в океан.

На рис. 14.6 изображен вынос растворенных солей в ионной форме в течение года с единицы площади речных бассейнов за многолетний период.

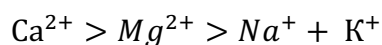


а б
 Рис. 14.6. Ионный речной сток России в виде модуля (а) и сток органических веществ (б).

Характеристика химического состава речных вод:

- Для рек с малой минерализацией состав относительно одинаков
- Характерно преобладание ионов $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$

и



- При увеличении минерализации, растет содержание ионов SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+

Химический состав речных вод в период наименьших расходов

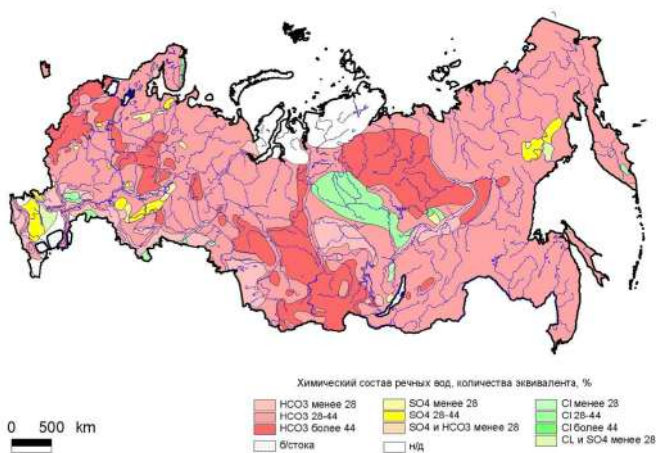


Рис. 14.7. Преобладающие анионы в химическом составе речных вод в период летней межени.

В привязке к географическим областям изменение химического класса речных вод имеет следующее разделение:

Реки в зоне тундры и лесной зоне	Минерализация мала, вода гидрокарбонатного класса кальциевой группы
Реки в степной и полупустынных зонах	Минерализация средняя или повышенная, вода сульфатного или хлоридного класса

	кальциевой, магниевой и натриевой группы
--	--

Азональные факторы формирования химического состава воды рек:

- Особенности геологического строения (пермские отложения, соленосные кембрийские породы);
- Залесенность и распаханность водосборов, заболоченность водосборов;
- Географическая закономерность распределения химического состава воды часто нарушается большими реками – сложными системами, объединяющими бассейны многих малых рек. Расстояние до полного смешения вод зависит от ширины, глубины, уклона, определяющих турбулентное перемешивание;
- Антропогенное загрязнение (аэротехногенный перенос, сбросы загрязненных вод, регулирование).

Гидрохимический режим рек

Гидрохимический режим рек – изменение химического состава речной воды в течение года (концентрация, соотношение между ионами, формами органических и биогенных веществ).

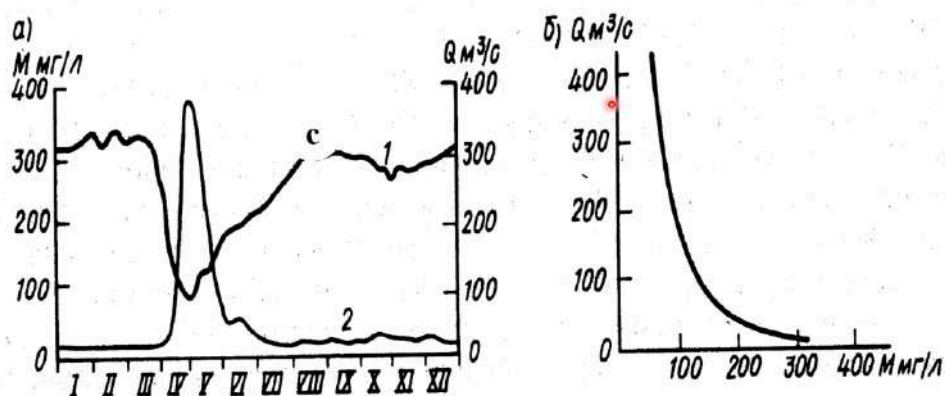


Рис. 14.8. Сезонное смещение расходов Q и минерализации рек.

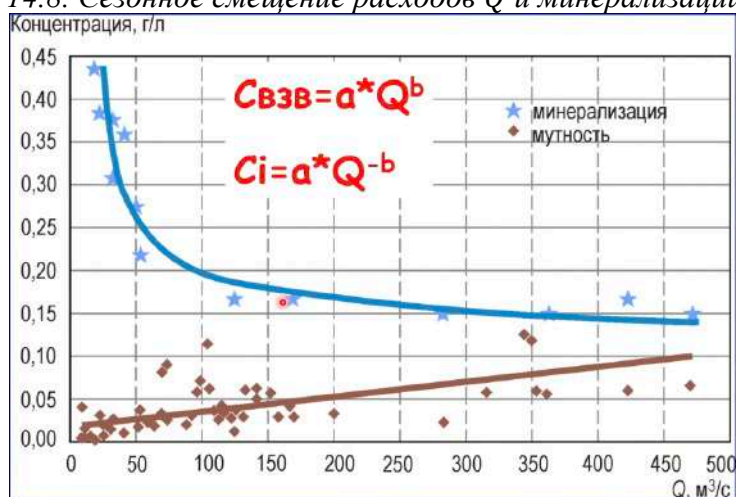


Рис. 14.9. Связь между расходами воды и концентрациями растворенных и взвешенных веществ (р. Протва, Сатино).

Подобная гиперболическая зависимость (рис. 14.10) отражает процесс разбавления речных вод в русле реки маломинерализованными талыми или дождевыми водами в периоды весеннего половодья или дождевых паводков. Отклонения от данного типа определяются:

- Химическим составом и физическими свойствами почв и пород речных водосборов;
- Природой компонента химического состава воды, т.е. степенью его консервативности;
- Типом гидролого-гидрохимического режима реки.

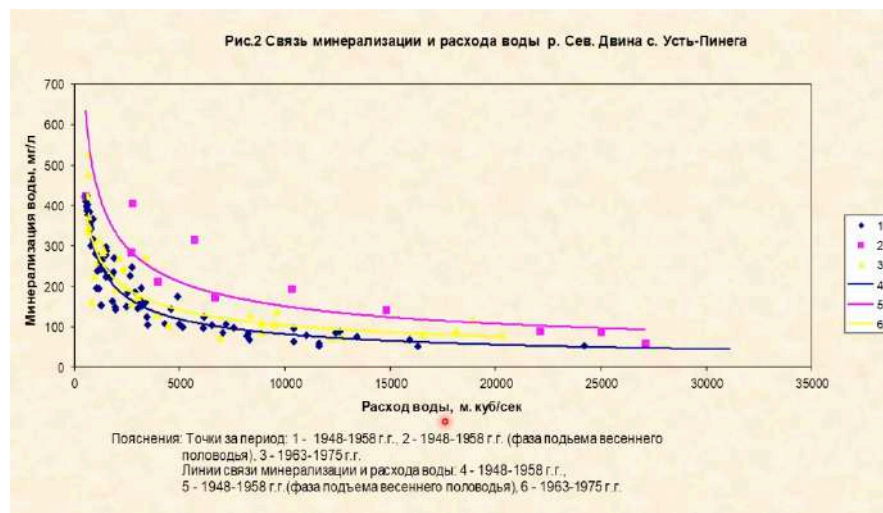


Рис. 14.10. Связь минерализации и расхода р. Сев. Двина с. Усть-Пинега
Две ветви данной зависимости могут характеризовать период подъема и период спада половодья:

- Для рек, текущих в меридиональном направлении;
- Для рек с большой площадью водосбора (>20000 км²);
- Для рек, на водосборе которых присутствует карст.

Связь между расходом и минерализацией имеет «пологий» характер, если для рек характерна естественная или искусственная зарегулированность.



Рис. 14.11. Изменение минерализации (1) и расхода воды (2).

Рассматривая гидрохимические режимы рек, также можно изучать содержание кислорода (рис. 14.12).

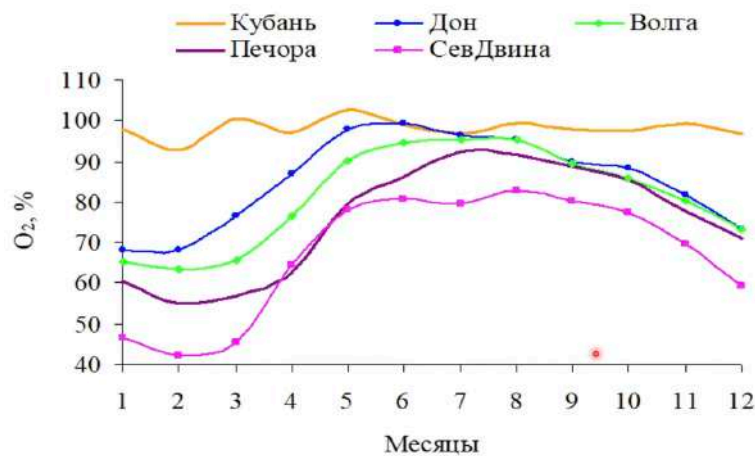


Рис. 14.12. Сезонные изменения содержания кислорода в реках Европейской территории России.

Водное хозяйство и химический состав речных вод:

- Качество воды;
- Жесткость воды;
- Пищевое водоснабжение;
- Промышленное водоснабжение;

- Здоровье населения;
- Водные экосистемы.

Качество воды

Качество воды (КВ) – это совокупность природных и химических свойств природной воды, определяющая ее пригодность для конкретного водопользователя; это также характеристика токсичности (по отношению к живым организмам) и/или пригодности для хозяйственных целей.

- КВ зависит от изменения стока воды, насосов, химических веществ, биологических субстанций, тепла;
- КВ может лимитироваться природными факторами;
- КВ ухудшается под влиянием техногенного загрязнения вод.

Характеристики качества воды бывают:

- Физические (температура, мутность);
- Химические (минерализация, содержание ионов);
- Биологические (биологические субстанции);
- Органолептические (запах).

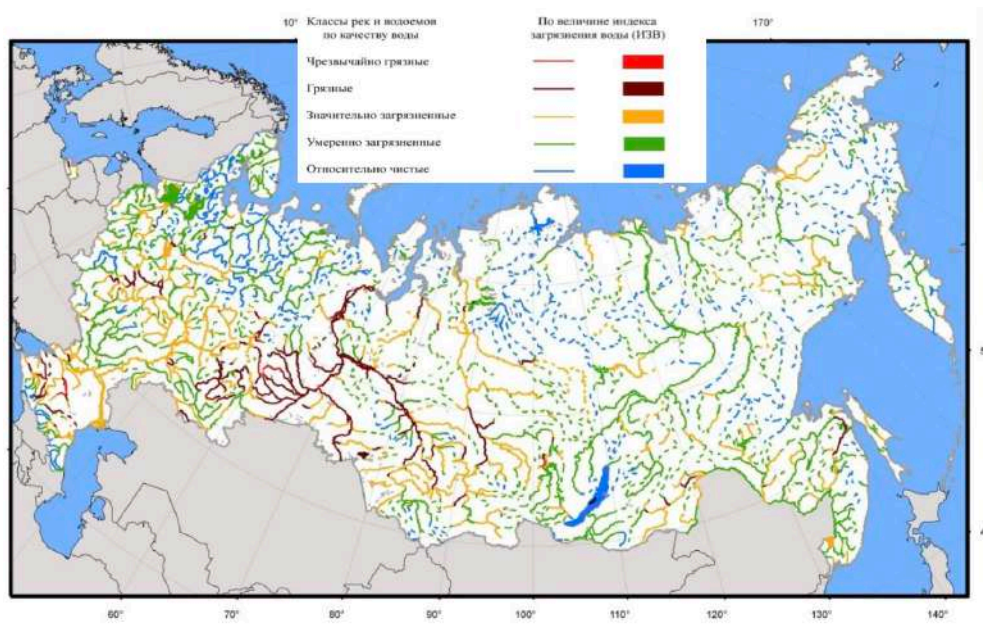


Рис. 14.13. Качество поверхностных вод России (по величине ИЗВ).

Классификация гидробионтов

Классификация:

- Планктон;
- Бентос;

- Нектон;
- Нейстон.

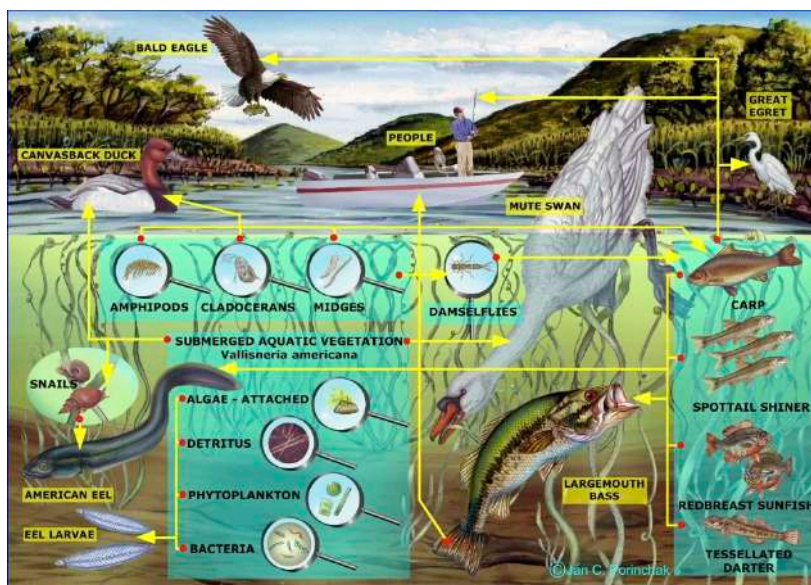


Рис. 14.14. Речной биоценоз.

Для характеристики КВ используется биотический индекс (БИ) Вудивиса. В основе метода – упрощение структуры биоценоза по мере повышения уровня загрязнения вод, за счет выпадения индикаторных видов (зообентоса) при повышении загрязненности воды, на фоне общего разнообразия организмов.

Воды	БИ
Очень чистые	10–8
Чистые	7–5
Умеренно загрязненные	4–3
Загрязненные	2–1
Грязные	1–0
Очень грязные	0

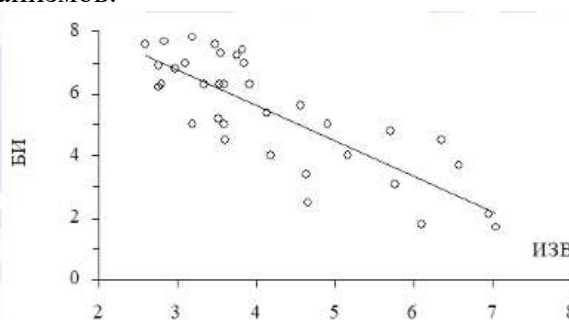


Рис. 14.15. Шкала БИ и соотношение между биотическим индексом (БИ) и индексом загрязненности воды (б).

Метод Вудивиса – один из наиболее надежных и широко используемых в мире методов биологической оценки воды. Индекс используется только для исследования рек умеренного пояса и дает оценку их состояния по 10-бальной шкале. Он учитывает сразу два параметра бентосного сообщества: общее разнообразие беспозвоночных и наличие в водоеме организмов, принадлежащих к «индикаторным» группам. В эти группы объединены животные, характеризующиеся определенной степенью сапробности. Метод основан на оценке видового разнообразия сообщества зообентоса и индикаторной (по отношению к загрязнению) значимости отдельных представителей донного биоценоза.

Показательные организмы		Видовое разнообразие	Общее число присутствующих "групп"				
			0-1	2-5	6-10	11-15	>15
Биотические индексы							
	Присутствуют личинки веснянок	Больше 1 вида	-	7	8	9	10
		Только 1 вид	-	6	7	8	9
	Присутствуют личинки поденок	Больше 1 вида	-	6	7	8	9
		Только 1 вид	-	5	6	7	8
	Присутствуют личинки ручейников	Больше 1 вида	-	5	6	7	8
		Только 1 вид	4	4	5	6	7
	Присутствуют гаммарусы	Все вышеназванные виды отсутствуют	3	4	5	6	7
	Присутствует водяной ослик	Все вышеназванные виды отсутствуют	2	3	4	5	6
	Присутствуют олигохеты и/или личинки хирономид	Все вышеназванные виды отсутствуют	1	2	3	4	-
	Все вышеназванные группы отсутствуют	Присутствуют некоторые виды, не требовательные к кислороду	0	1	2	-	-

Рис. 14.16. Организмы, наличие которых свидетельствует о чистой/загрязненной воде.

Лекция 15. Устья рек и особенности их гидрологического режима

Устьевая область реки

Устье – особый географический объект в районе впадения реки в приемный водоем. Имеет специфический природный комплекс и структуру. Эволюция устья регулируется устьевыми процессами. Актуальность изучения устьев рек связана с хозяйственной деятельностью, протекающей в этой области.

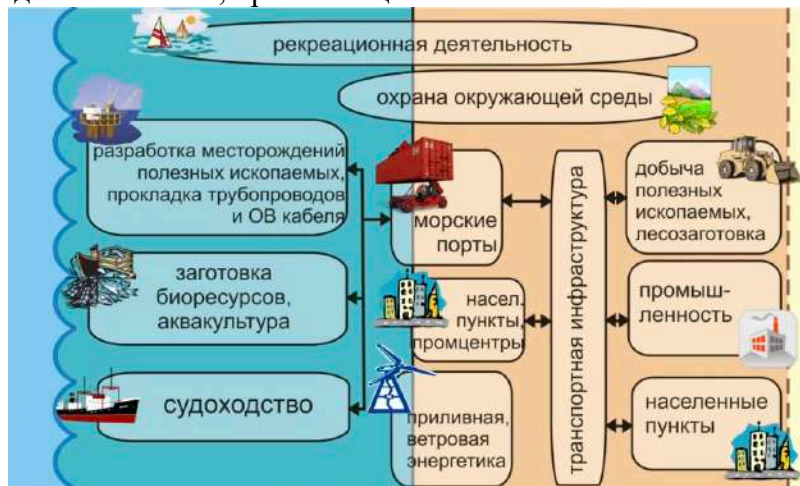


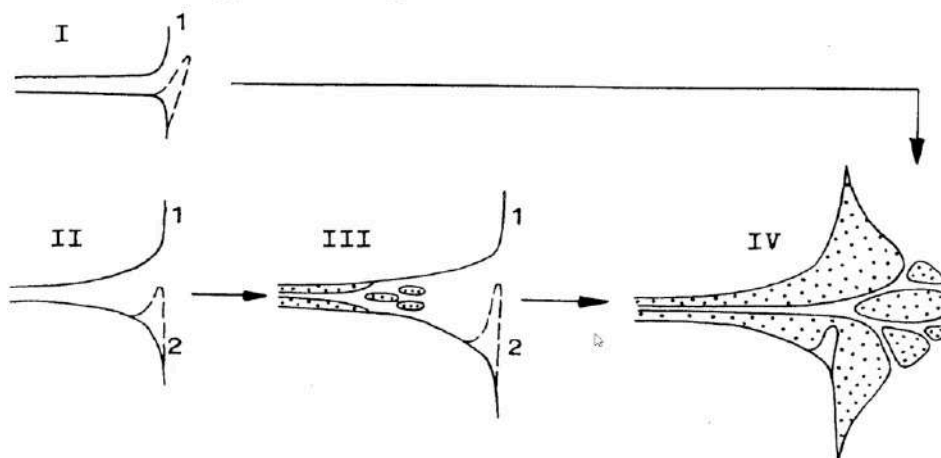
Рис. 15.1. Хозяйственная деятельность в устьях рек.

Типы устьев рек:

- Простое впадение;
- Эстуарный;
- Эстуарно-дельтовый;
- Дельтовый.



Рис. 15.2. Типы устьевых областей рек (Михайлов, 1977).



Устьевые области: I — простая, II — эстуарная, III — эстуарно-дельтовая (с дельтой выполения), IV — дельтовая (с дельтой выдвигения); 1 — морской берег без блокирующей косы, 2 — с блокирующей косой

Рис. 15.3. Схема эволюции устьевых областей рек и дельтообразования при стабильном уровне приемного водоема.

Виды эстуарного устья определяются факторами, послужившими возникновению самого устья (рис. 15.4).

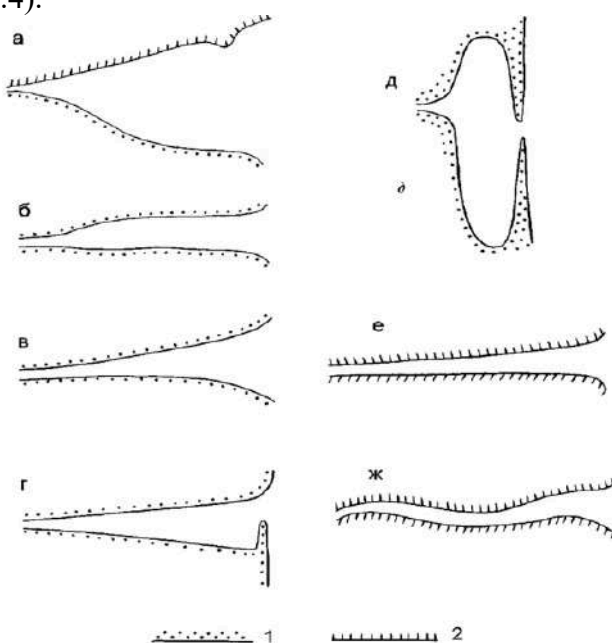
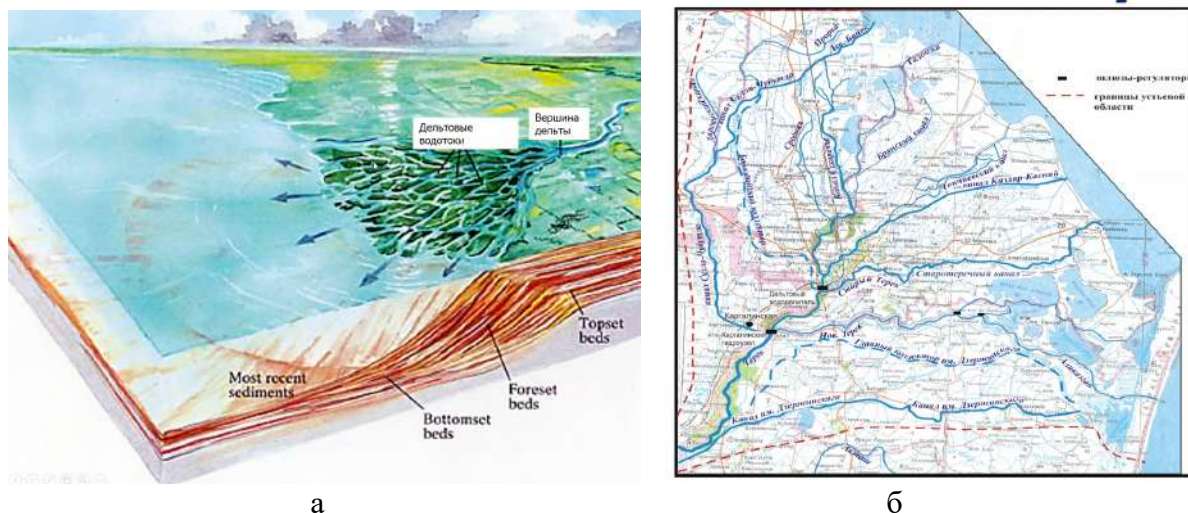


Рис. 15.4. Виды эстуарного устья: морской залив (а), губа (б), приливной эстуарий (в), лиман (г), лагуна (д), фиорд (е), риас (ж); 1 — неизменные аккумулятивные, 2 — горные берега.

Дельта реки

Дельта — верхняя наводная часть низменности, сложенная современными речными и морскими отложениями, с изменчивой структурой водотоков и водоемов [Михайлов, 1998].



а

б

Рис. 15.5. Схематичный вид дельты (а) и особенности строения систем водотоков в дельтах рек (б).

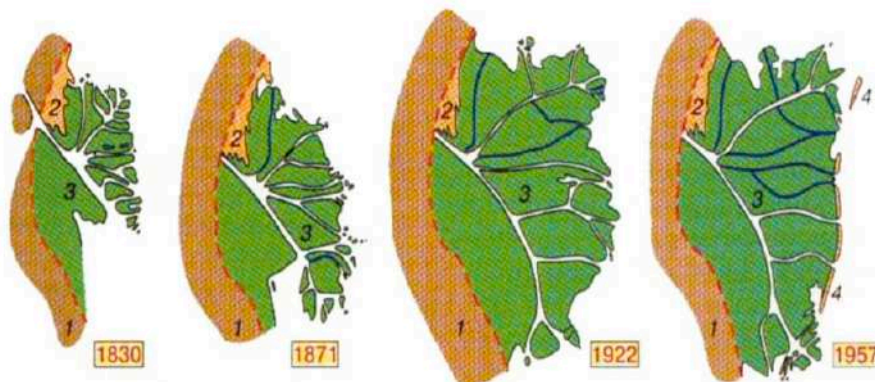


Рис. 15.6. Примеры дельт.



а

б

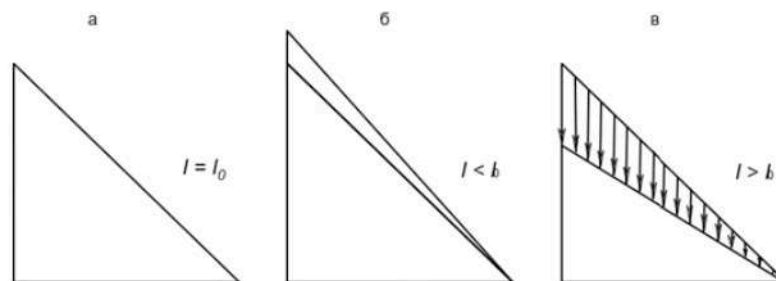
Рис. 15.7. Структура русловой сети дельт: предельно упрощенная структура русловой сети дельты р. Эбро (а), многорукавная дельта р. Селенга (б).

К механизмам эволюции устьев рек относятся:

- Изменение уровня приемного водоема;
- Изменение речного водоема;
- Устьевые процессы.

Факторы эволюции речных дельт бывают:

- Геологические (направленность тектонических движений);
- Геоморфологические (отмелое или приглубое взморье);
- Морские (уровень воды, энергия морского волнения);
- Речные (сток воды и наносов);
- Хозяйственная деятельность (изменение речного стока, базиса эрозии и т. п.)



Реакция продольного профиля дна на устьевом участке реки на изменение факторов эволюции дельт

Рис. 15.8. Факторы эволюции речных дельт.

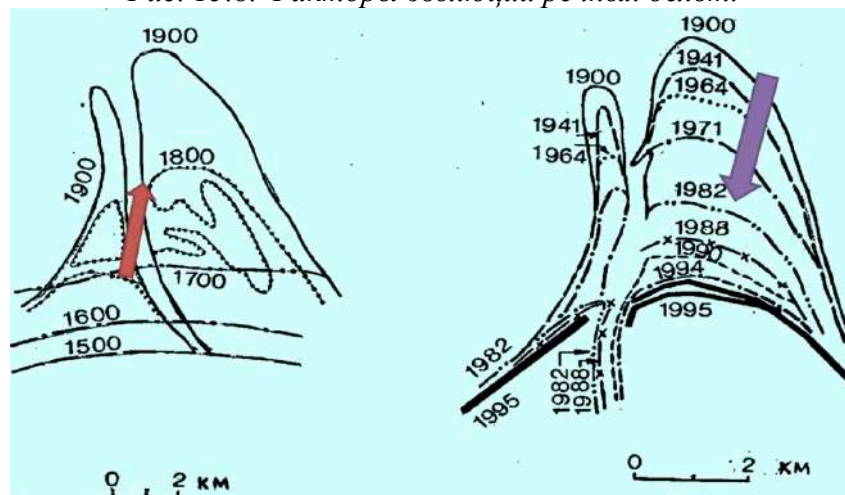


Рис. 15.9. Изменение площади дельты Нила при естественном и современном стоке речных наносов ниже Асуанской плотины.

Устьевые процессы



Рис. 15.10. Устьевые процессы.

Устьевые процессы:

- Взаимодействие вод реки и моря;
- Затухание скорости движения воды на устьевом взморье;
- Аккумуляция речных наносов;
- Развитие устьевых баров и др.
- Выдвижение дельны, русловые процессы;
- Перераспределение стока по пространству устья;
- Смещение пресных и соленых вод;
- Динамическое взаимодействие морских и речных вод (приливы, нагоны, соленый клин).

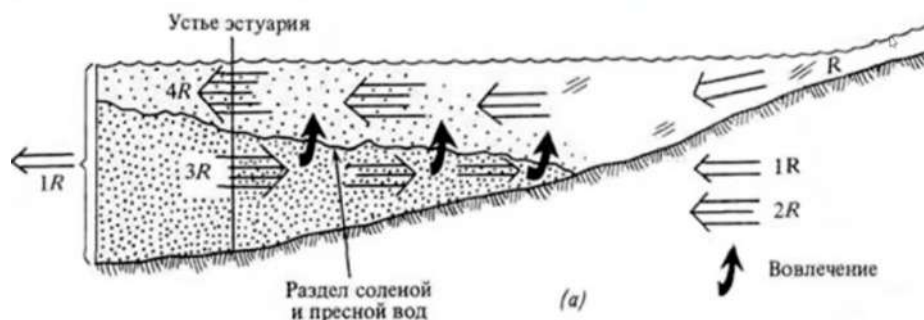


Рис 15.11. Смещение речных и морских вод.

Маргинальный эффект – трансформация потоков вещества и энергии в устьевых областях рек под влиянием комплекса физических, химических и биологических процессов (Лисицын, 1994). К процессам относятся:

- Седиментация;
- Коагуляция;
- Сорбция, десорбция;
- Биоаккумуляция.

В среднем для рек мира в этой зоне откладывается. 93-95% от взвешенных и 20-40% от растворенных веществ речного стока (включая загрязнения).

Зона смешения речных и морских вод меняется в пространстве и времени и зависит от соотношения речных и факторов.

Речная граница (1 ‰):

- В ВПВ до 10 км в сторону реки;
- В НМВ до 25 км в сторону моря;
- Выраженная сезонная и суточная изменчивость.

Морская граница (25‰):

- До 60 км в сторону моря;
- Преимущественно сезонная изменчивость;

Общая протяженность ЗС – около 70 км.

Приливы в устьях рек

С процессом смешения связано влияние приливов. На рис 15.12. приливы в устьях рек показаны на примере России. Наибольшие приливы присутствуют в беломорских реках, реках, впадающих в Белое море, а также в дальневосточной области.

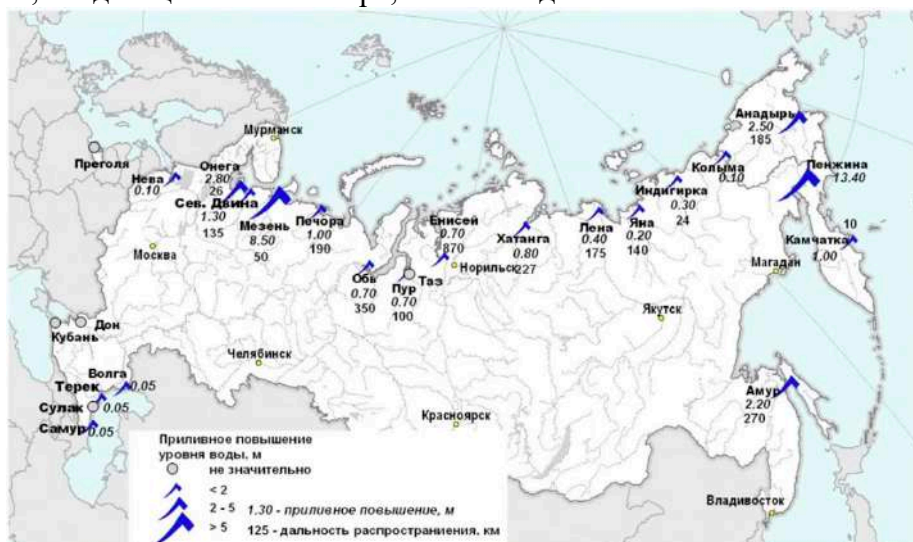


Рис. 15.12. Приливы в устьях рек.

Приливы могут использоваться для выработки энергии (рис. 15.13). Помимо положительных эффектов есть и отрицательные, например, затруднение водообмена и возникновение сероводородных зон на дне.



а



б

Рис. 15.13. Выработка энергии с помощью приливов: приливная мельница, Лондон (а), Кислогубская ПЭС, Кольский залив (б).

Хозяйственное значение устьев рек:

- Конечное звено речных систем;
- Благоприятные аональные климатические условия;
- Выгодное экономико-географическое положение;
- Повышенные биологические ресурсы.

Лекция 16. Гидрология озер Озеро

Озеро – природный водоем с замедленным водообменом. Обычно озера обладают выработанными под воздействием ветрового волнения берегами. Озера не имеют непосредственной связи с океаном.

Для образования озера необходимы два переменных условия: наличие естественной котловины, т. е. замкнутого понижения земной поверхности, и находящегося в этой котловине определенного объема воды.

Распространение озер на планете:

- Максимально представлены в районах древнего оледенения;
- В районах вечной мерзлоты;
- В областях внутреннего стока в поймах рек;
- В дельтах.

Озерность некоторых стран (%):

- Финляндия: 9,4;
- Швеция: 8,6;
- Россия: 2,1.

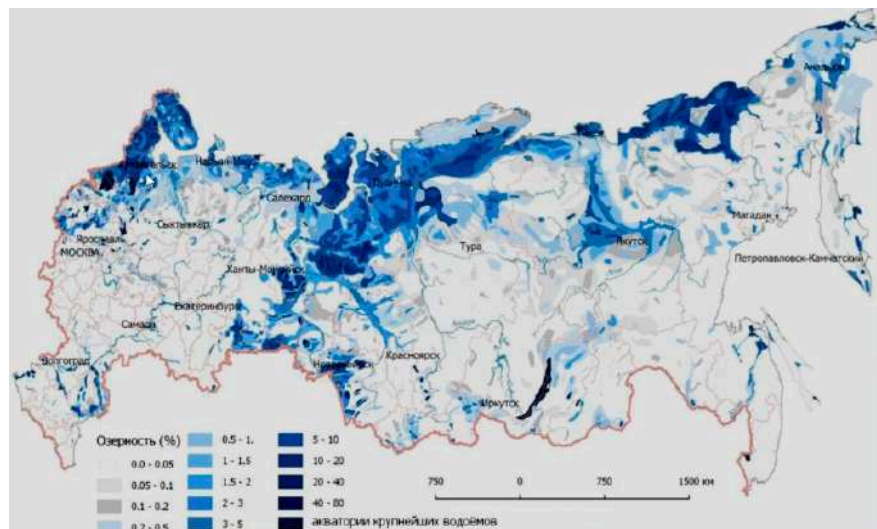


Рис. 16.1. Карта естественной озерности Российской Федерации.

Общая площадь всех озер мира – 2,058 млн км² (около 1,4% площади всей суши Земли). Площадь всех пресных озер на планете – 1,234 млн км², солоноватых и соленых – 0,822 млн км². Во всех озерах мира содержится 176,4 тыс. км³; объем пресных озер – 91,0 тыс. км³, солоноватых и соленых – 85,4 тыс. км³.

В России находится 34 крупнейших озера с площадью более 250 км². Их суммарная площадь равна 84 779 км². Таких озер в Европейской части России – девять, а в Азиатской части – 25. Озер с площадью более 1000 км² всего восемь (по четыре в

ЕЧР и АРЧ). Их суммарная площадь составляет 74 020 км². На долю Байкала приходится почти 90% объема вод во всех пресных озерах мира.

Классификация озер

Типизация озер по размеру:

- Очень большие: $F > 1000 \text{ км}^2$;
- Большие: $100 < F < 1000 \text{ км}^2$;
- Средние: $10 < F < 100 \text{ км}^2$;
- Малые: $F < 10 \text{ км}^2$.

По времени существования:

- Постоянные;
- Временные.

По географическому положению:

- Интразональные – озеро и водосбор находятся в одной природной зоне;
- Полизональные – озеро и водосбор находятся в 2 и более природных зонах;
- Горные озера и крупные водоемы обычно полизональны.

По происхождению (озер и озерных котловин):

Тектонические – наследуют крупные тектонические прогибы (Ладожское, Онежское, Ильмень, Верхнее, Балхаш), занимают тектонические трещины (Байкал, Танганьика, Ньяса). Такой генезис имеют >50% озер;



Рис. 16.2. Тектоническая котловина оз. Накуру, Кения.

- Вулканические – располагаются в кратерах вулканов, возникают вследствие подпруживания воды лавовыми массами (озера Италии, Японии, Кроноцкое (Камчатка), Киву (Африка));



Рис. 16.3. Чхонджи «Небесное озеро», Китай и Северная Корея.

Небесное озеро занесено в Книгу рекордов Гиннеса, как самое высокое кратерное озеро в мире – высота поверхности озера составляет 2189 с. Озеро имеет площадь 9,82 км², с середины октября по середину июня водная поверхность покрыта льдом. Вода очень прозрачная. В озере водится несколько видов рыб, по большей части речная мальма. Кратер образовался в результате сильного извержения в 969 году (± 20 лет).

- Метеоритные – возникают в метеоритных воронках, встречаются относительно редко;

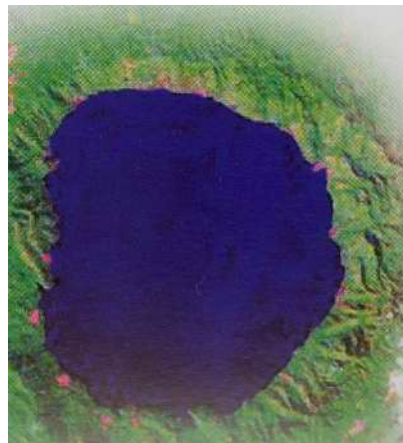


Рис. 16.4. Метеоритное озеро на территории КНР.

Озеро Светлояр находится в Нижегородском Заволжье, памятник природы федерального назначения. Со Светлояром связана легенда о затонувшем граде Китеже, располагавшемся некогда на его территории. Вода здесь невероятно чистая, гидрокарбонатно-кальциевого типа, прозрачна на глубину более 5 м.



Рис. 16.5. Озеро Светлояр, Россия.

Взгляд на происхождения озера с момента его изучения менялся и до сих пор не решен однозначно. Различными исследователями в разное время высказывались гипотезы о ледниковом, карстовом, старичном, вулканическом, неотектоническом, солянокупольном и космическом – метеоритном происхождении озера. Первым исследователем озера в конце XIX в. был великий русский ученый-почвовед В. В. Докучаев и его первая версия происхождения: озеро – метеоритный кратер. В 2009 году опубликованы результаты полевых исследований, подтверждающие гипотезу о метеоритном происхождении озера 3,0-3,2 тыс. лет назад. В пользу метеоритного происхождения озера свидетельствуют: правильная форма, глубина, геологическая структура окружающих холмов, стратиграфия донных отложений, многочисленные фрагменты оплавленных пород, округлые каплевидные образования черной вспененной стеклообразной массы, аналогичные импактитам. Небесное тело, создавшее Светлояр, могло двигаться с севера на юг по низкой траектории под углом 30-40° к поверхности Земли, о чем свидетельствует даже наибольшая глубина дна, находящаяся именно на юге.

- Ледниковые – троговые (результат экзарации), каровые (созданы эрозионной работой ледника, расположены на склонах гор в карах), моренные (созданы ледником, подпружены конечной мореной; озера древнего и современного оледенения), приледниковые, надледниковые;



Рис. 16.5. Ледниковые озера.

- Карстовые – возникают вследствие растворения водой горных пород (гипс и т. д.), могут быть поверхностными и подземными (озера на Урале, на Кавказе, в Крыму);



Рис. 16.6. Морской Глаз, Мушыл.

Озеро с рис. 16.6 находится в Марий Эл, местные жители называют его Морским Глазом из-за округлой формы и необычного цвета воды – изумрудно-зеленого. Существуют красивые легенды о его происхождении. Так, одна из них гласит, что в нижних слоях озера есть морские бархатные водоросли, которые и придают воде неповторимый изумрудный цвет. Озеро появилось 20 тыс. лет назад в результате карстового провала. Глубина – 42,4 м. это значит, что под водой можно спрятать 14-этажный дом. Имеет связи с подземными пустотами, которые до сих пор не изучены.

- Термокарстовые – существуют в районах мерзлоты, возникают вследствие оттаивания и просадки грунтов;



Рис. 16.7. Термокарстовые озера в низовье Колымы.

- Суффозионные – возникают на участках выноса подземными водами мелких частиц грунта, распространены в степных и лесостепных районах Сибири;



Рис. 16.8. Суффозионные озера.

- Речные – старицы, дельтовые озера, долинные (завальные);

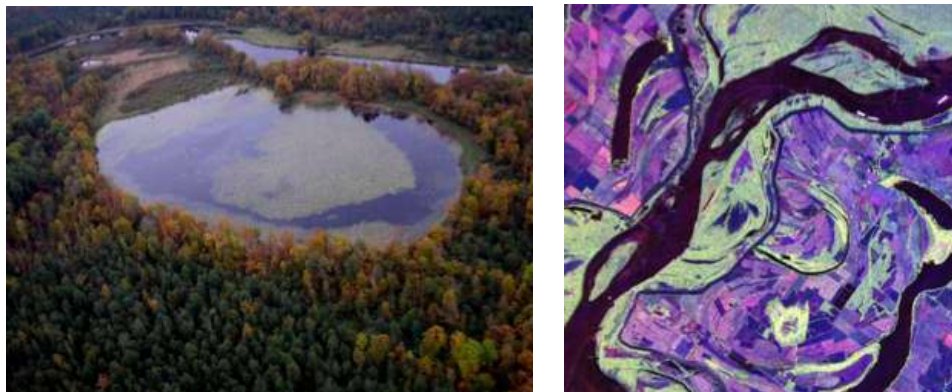


Рис. 16.9. Речные озера.

- Морские – лиманы (при затоплении местности в условиях повышения уровня моря), лагуны (при отчленении водоема от берега косами); Розовое озеро или озеро Ретба находится в Сенегале, свое название оно получила из-за особого цвета воды. Такой цвет вызван большим количеством цианобактерий в воде, поглощая солнечный свет, микроорганизмы выделяют пигмент, окрашивающий воду. Особенно он заметен во время сухого сезона. Другой органической жизни в Ретбе нет – для водорослей и рыбы концентрация соли в воде слишком высока. Ее содержание достигает 40%, соль добывают со дна этого озера уже на протяжении почти 50 лет.



Рис. 16.10. Озера Ретба, Сенегал.

- Эоловые – образуются в понижениях между песчаными дюнами;



Рис. 16.11. Озеро Ньос или «озеро-убийца», Камерун.

Это озеро в Камеруне – одно из немногих известных в мире взрывающихся озер. Прямо под ним расположена полость с магмой, которая наполняет Ньос углекислым газом и превращает его воды в угольную кислоту. В 1986 году озеро произвело громадный выброс углекислого газа, из-за которого задохнулось 1 700 людей и 3 500 голов скота из близлежащих деревень. Это стало крупнейшим случаем асфиксии вследствие природного явления. Есть опасность, что такое может произойти на одном из трех взрывающихся озер мира. На самом деле именно Ньос может оказаться самым вероятным местом повторной катастрофы, т. к. природное русло, по которому течет озеро, хрупкое и уязвимо появлению трещин.

- Органогенные – водоемы, возникающие на заболоченных территориях.



Рис. 16.12. Органогенное озеро.

Отличия озер по типу водообмена:

- Сточные (частный случай – проточные) Поступающая в них вода расходуется на образование речного стока;
- Бессточные. Поступающая в озера вода расходуется на испарение, фильтрацию и не образует стока. Внутренние водоемы.

Морфология и морфометрические характеристики озер

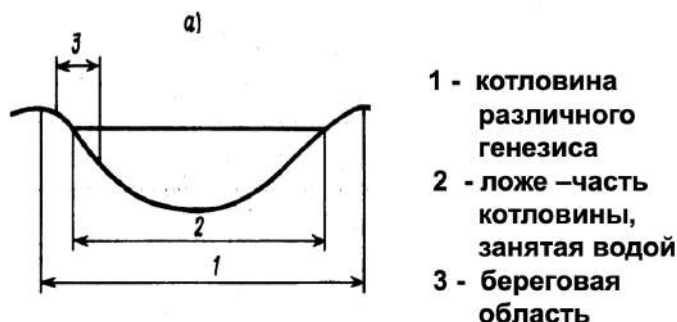


Рис. 16.13. Морфологические элементы озер.

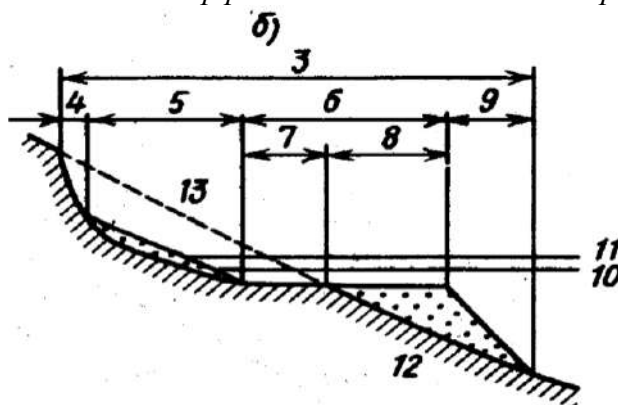


Рис. 16.14. Элементы абразионного типа берега: береговая область (3), береговой отступ (4), побережье (5), береговая отмель (6), абразионная и аккумулятивная часть отмели (7 и 8), подводный откос (9), высший и низший уровни воды (10,11), положение коренных пород (12), начальный профиль берега (13).

Другие морфологические элементы озера:

- Плесы;
- Заливы;
- Бухты.

Районирование ложа озера по глубинам:

- Литораль – мелководная часть ложа, сильное влияние волн (побережье + береговая отмель);
- Сублитораль (подводный откос);
- Пелагиаль – глубоководная часть ложа;
- Профундаль – придонная область озера.

- площадь зеркала $F_{оз}$
- объем воды $V_{оз}$
- длина береговой линии $L_{бп}$
- кратчайшее расстояние между максимально удаленными точками береговой линии – длина $L_{оз}$
- максимальная ширина $B_{ом}$
- ширина $B_{оз}$

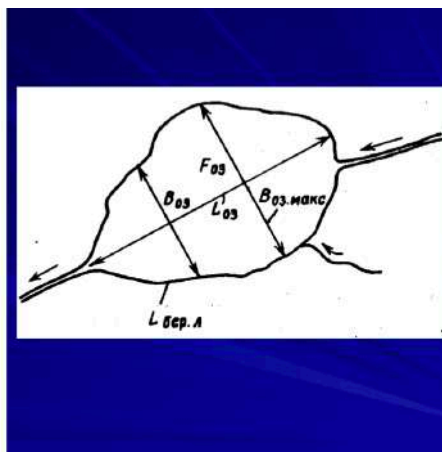


Рис. 16.15. Морфометрические характеристики озер.

Средняя ширина:

$$B_{оз} = \frac{F_{оз}}{L_{оз}} \quad (16.1)$$

Средняя глубина:

$$h_{оз} = \frac{V_{оз}}{F_{оз}} \quad (16.2)$$

Влияние колебаний уровня воды на морфометрические характеристики озер: морфометрия – система количественных показателей, которая позволяет познать процессы, протекающие в водоемах и вызывающие изменения их подводного рельефа.

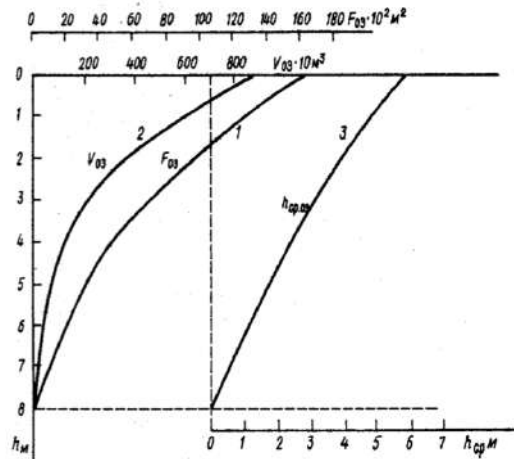


Рис. 16.16. Морфометрия: 1 – кривая площадей ($F_{03} = f(H)$), 2 – кривая объемов ($V_{03} = k(H)$), 3 – кривая средних глубин озера ($h_{03} = I(H)$).

Водный баланс озер

Допустим есть некое озеро. Приходные составляющие водного баланса: поверхностный и подземный притоки, осадки, поступающие на акваторию озера. Расходные составляющие: испарения, подземный отток и сток реки, вытекающий из этого озера.

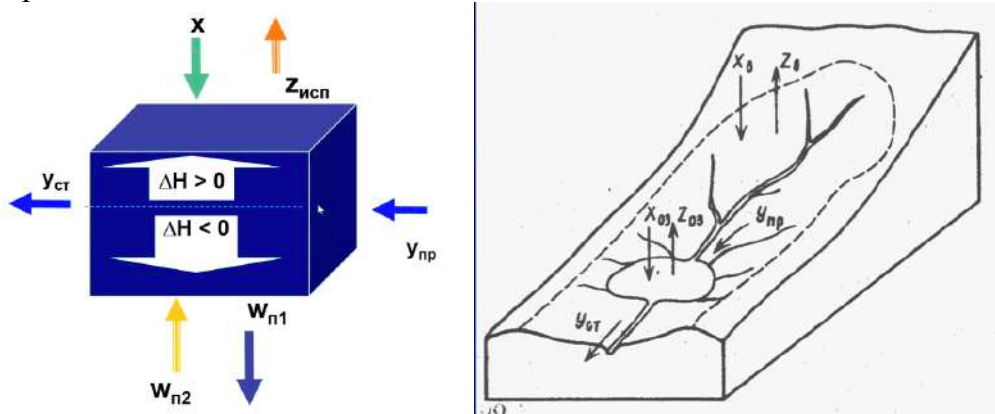


Рис. 16.17. Графическое изображение переменных уравнения водного баланса проточных озер.

$$x + y_{пр} + y_{сбр} + z_{конд} + w_{пр} = y_{ст} + y_{вдзб} + z_{исп} + w_{ст} \pm \Delta u, \quad (16.3)$$

где $\pm \Delta u$ – изменение запасов воды в озере, $y_{пр}$ – поверхностный приток, $z_{конд}$ – конденсация на поверхность, x – осадки, $w_{пр}$ – подземный приток, $y_{ст}$ – сток из озера, $y_{вдзб}$ – водозаборы, $z_{исп}$ – испарение, $w_{ст}$ – подземный сток.

Для бессточных озер уравнение водного баланса выглядит следующим образом:

$$x + y_{пр} + y_{сбр} + z_{конд} + w_{пр} = y_{вдзб} + z_{исп} + w_{ст} \pm \Delta u \quad (16.4)$$

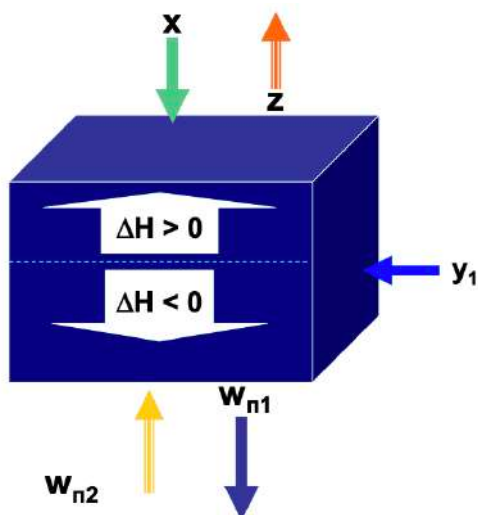


Рис. 16.18. Графическое изображение переменных уравнения водного баланса бессточных озер.

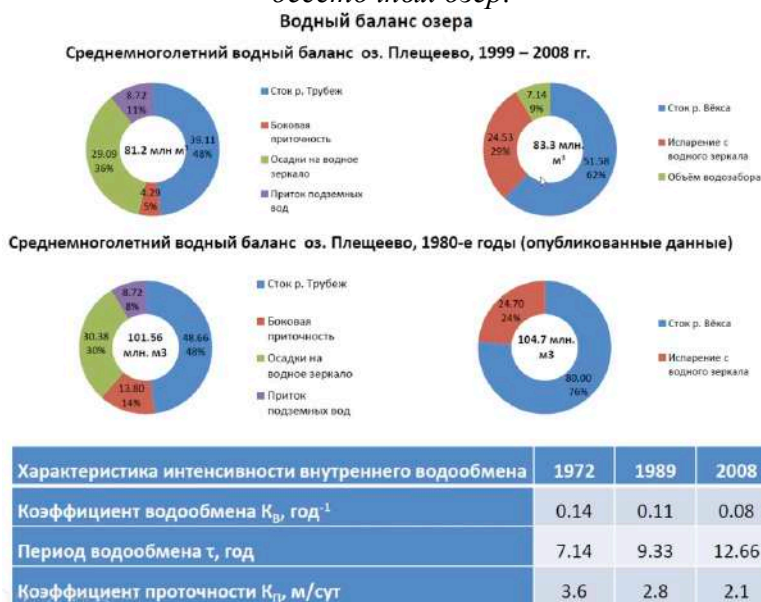


Рис. 16.19. Пример: среднеголетний баланс оз. Плещеево.

Уровень равновесия (уровень тяготения) – уровень озера, при котором расходная и приходная часть баланса одинаковы.



Рис. 16.20. Колебания уровня Каспийского моря.

Классификация озер по структуре водного баланса:

- Расходной части баланса: стоковые ($y_2 > z$), испаряющие ($y_2 < z$);
- Приходной части баланса: приточное ($y_1 > x$), нейтральное ($y_1 \sim x$), дождевое ($y_1 < x$).

Коэффициент условного водообмена (год):

$$K_B = \frac{(y_1 + x)}{V} \approx \frac{y_2}{V} \quad (16.5)$$

Период условного водообмена (годы):

$$\tau = K_B^{-1} \quad (16.6)$$



Рис. 16.21. Отличие периода водообмена (времени, за которое происходит полное обновление водного объекта) различных озер.

Колебания уровня воды в озерах

Все колебания можно разделить на многолетние, сезонные и кратковременные. Начнем с многолетних.

1. Колебания уровня, связанные с изменением объема (массы) воды в озере и определяемые, таким образом, в основном изменениями составляющих водного баланса водоема (такие колебания уровня иногда называют объемными или водно-балансовыми).

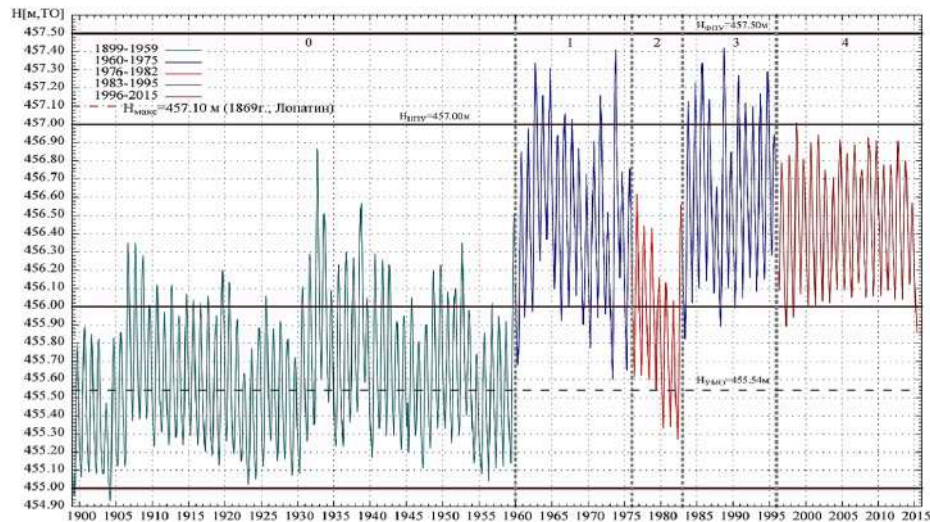


Рис. 16.22. Уровенный режим оз. Байкал в естественных (0) и зарегулированных (1-4 этапы) условиях.

2. Колебания уровня, не связанные с изменениями объема вод в озере, а определяющиеся перераспределением неизменного объема по пространству озера (такие колебания уровня часто называют деформационными).

Второй пример, в большей степени зависящий от антропогенных факторов, – озеро Севан (рис. 16.22).

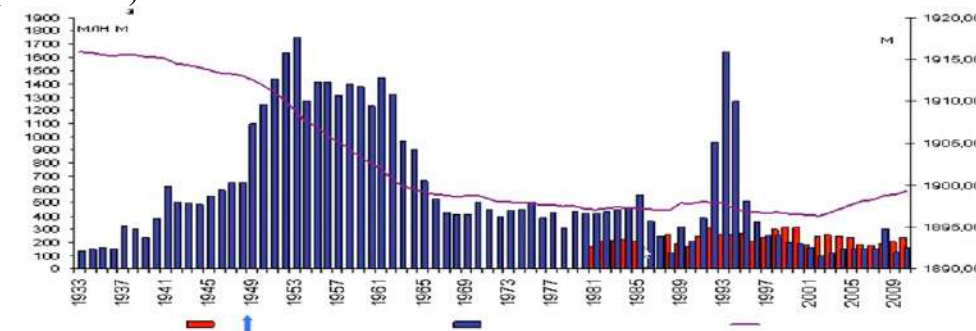


Рис. 16.23. Антропогенные изменения уровня воды оз. Севан: изменения уровня озера, синие столбики – пуски воды из озера; красные столбики – поступление воды в озеро через тоннель Арпа-Севан.

Говоря о многолетней изменчивости озер, можно также привести пример с озером Иссык-Куль – крупнейшим в Киргизии и одним из красивейших в мире. Шестое по глубине в мире. Бессточное, в него впадает около 80 небольших притоков, при этом не вытекает ни одна река. Минерализация около 6 промилле, объем – 1738 км³, площадь – 6236 км².



Рис. 16.24. Иссык-Куль, Киргизия.

Перейдем к прочим типам колебаний уровня воды.

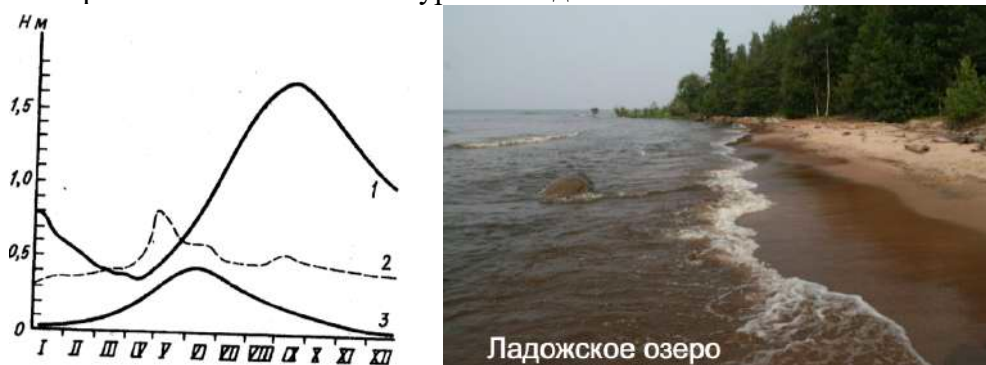


Рис. 16.25. Сезонные колебания уровня воды в озерах: Телецкое (1), Плещеево (2), Ладожское (3).

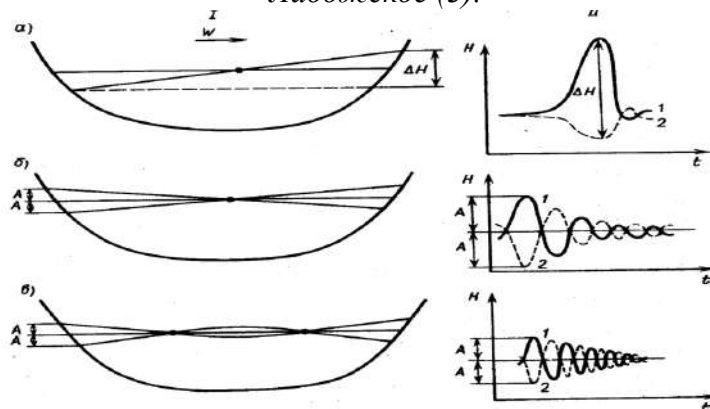


Рис. 16.26. Кратковременные изменения уровня воды в озерах: под влиянием сгонно-нагонных явлений (Ia), одноузловой (Iб), двухузловой (Iв), сейши у противоположных берегов (II-1,2).

Термический режим озер. Ледовые явления на озерах

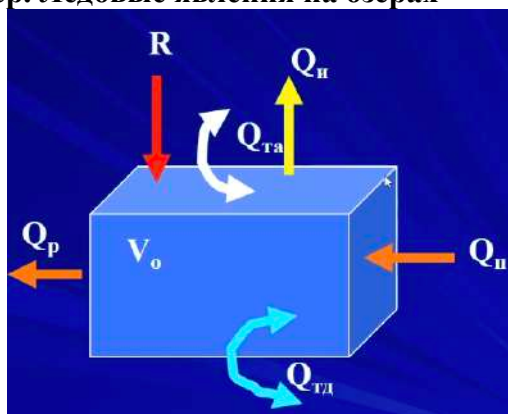


Рис. 16.27. Графическое изображение переменных уравнения теплового баланса озер.

Изучение термического режима также связано с составлением уравнений теплового баланса. Уравнение теплового баланса озер:

$$\Delta = (Q_{\text{и}} + Q_{\text{р}}) - (Q_{\text{п}} + R) \pm Q_{\text{та}} \pm Q_{\text{тд}} = C_p \rho V_o \Delta T = -\Delta E, \quad (16.7)$$

где $Q_{\text{п}}$ – поступление тепла с притоком поверхностных вод, $Q_{\text{р}}$ – расход теплоты за счет вытекающей реки, R – поглощение солнечной радиации, $Q_{\text{та}}$ – турбулентный теплообмен атмосферой, $Q_{\text{и}}$ – испарение, $Q_{\text{тд}}$ – теплообмен с дном, грунтовыми водами.

$$\Delta > 0, \quad \Delta T < 0$$

$$\Delta < 0, \quad \Delta T > 0$$

Тепловой баланс озера

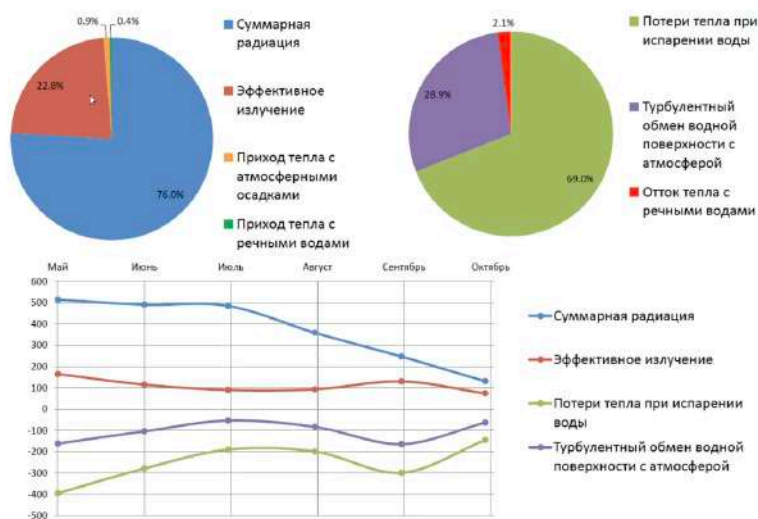


Рис. 16.28. Пример соотношений приходных и расходных составляющих теплового баланса (оз. Плещеево).

Факторы перераспределения тепла в озерах:

- Динамическое (ветровое) перемешивание;
- Конвективное перемешивание.

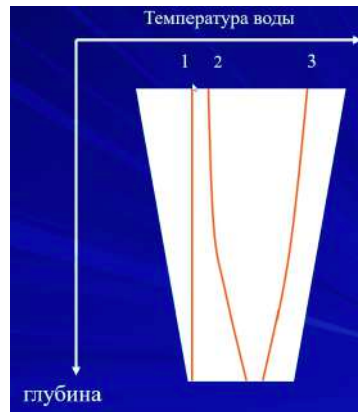


Рис. 16.29. Виды распределения температуры воды по глубине озер: гомотермия (1), обратная стратификация (2), прямая стратификация (3).

Благодаря таким особенностям была предложена термическая классификация озер (Ф. А. Форель):

- Полярные озера: холодные ($T < 4^{\circ}\text{C}$), преобладает обратная температурная стратификация;

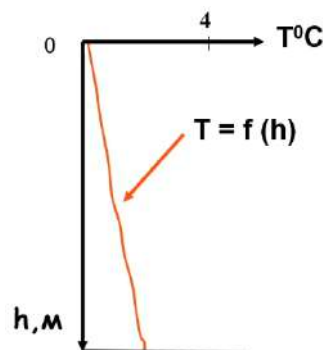


Рис. 16.30. Термические особенности полярных озер.

- Озера умеренной зоны: теплые летом ($T > 4^{\circ}\text{C}$) и холодные зимой ($T < 4^{\circ}\text{C}$), осенью и весной наблюдается условие $T \approx 4^{\circ}\text{C}$;

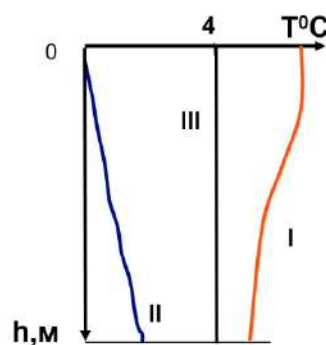


Рис. 16.31. Термические особенности озер умеренной зоны: прямая (1), обратная (2) стратификации, гомотермия (3).

- Тропические озера: теплые ($T > 4^{\circ}\text{C}$), преобладает прямая температурная стратификация.

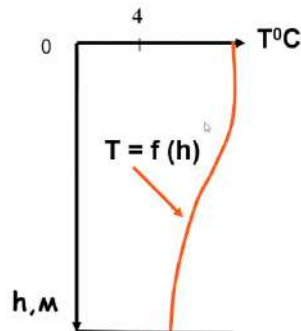


Рис. 16.32. Термические особенности тропических озер.

Сезоны термического режима озер умеренного климата:

- Весеннее нагревание: повышение T в поверхностном слое до 4°C , нарушение плотностной устойчивости и конвекция, перемешивание до состояния гомотермии ($T(h) = 4^{\circ}\text{C} = \text{const}$);

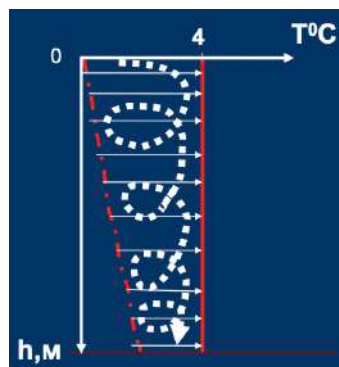


Рис.16.33. Характеристики сезона весеннего нагревания озер.

- Летнее нагревание: прогрев поверхностного слоя водной массы (ВМ), устойчивая плотностная стратификация ВМ, три зоны с характерным изменением $T(1,2,3)$, возможно лишь динамическое перемешивание ВМ;

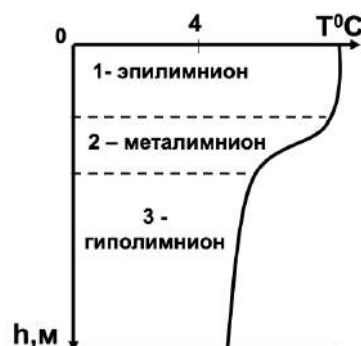


Рис.16.34. Характеристики сезона летнего нагревания озер.

- Осеннее охлаждение: более быстрое охлаждение поверхности воды до $T = 4^{\circ}\text{C}$, потеря плотностной устойчивости и перемешивание ВМ, осенняя гомотермия и зимнее охлаждение ВМ;

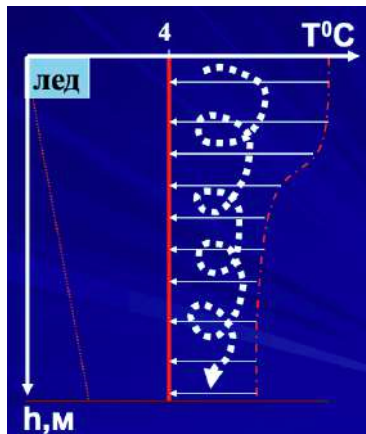


Рис.16.35. Характеристики сезона осеннего охлаждения озер.

- Зимнее охлаждение: охлаждение водной массы, температура поверхности близка к 0°C , у дна – к $2-3^{\circ}\text{C}$.

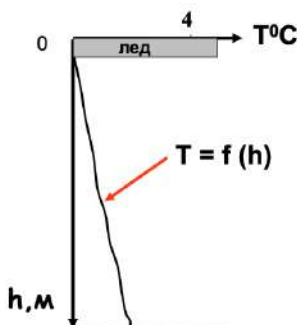


Рис.16.36. Характеристики зимнего сезона озер.

Классификация озер по типу ледового режима:

- Не имеют ледовых явлений;
- С неустойчивым ледоставом;
- С устойчивым ледоставом;
- С круглогодичным ледоставом.

Для ледового режима озер зоны умеренного климата характерны фазы замерзания, ледостава и вскрытия.

Среди типов озерного льда можно выделить водно-кристаллический, водно-снеговой и снеговой.

Гидрохимические характеристики озер. Классификация озер по минеральному и солевому составу

Классификация озер по минерализации:

- Пресные ($S < 1\text{‰}$);
- Солончатые ($1 < S < 25\text{‰}$);
- Соленые ($25 < S < 50\text{‰}$);
- Рассол ($S > 50\text{‰}$);
- Минеральные озера – озера с соленостью больше, чем в океане (35‰).

Самое большое в мире высохшее озеро находится в Боливии. Солончак образовался после того, как бывшее на этом месте древнее озеро оказалось отрезано от всех питающих его источников. Вода испарилась, и равнина покрылась толстым слоем соли. Солончак популярен не из-за количества соли, а из-за эффекта, возникающего во время дождя. Разливаясь по поверхности, вода образует невероятно тонкое «зеркало».

Соленость некоторых озер:

Название	Типы озер	Соленость, ‰
Байкал	Ультрапресное	<0,1
Севан	Пресное	0,7
Балхаш	Солончатое	1,2-4,2
Иссык-Куль	Солончатое	5,0-8,0
Эльтон, Баскунчак	Соленое	200-300
Мертвое море	Соленое	262-287

Химический состав озерных вод:

1. Определен содержанием основных ионов (анионов, катионов);
2. Существуют классы гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных вод;
3. Существуют группы кальциевых, магниевых и натриевых вод.



Рис. 16.37. Зональное изменение химического состава озерных вод.

При высоком содержании солей (рассол, рапа) возможно достижение состояния насыщения – самосадочное озеро. Классификация:

4. Карбонатные: сода;
5. Сульфатные: мирабилит, эпсомит;
6. Хлоридные: галит (поваренная соль).

Классификация озер по условиях питания гидробионтов:

7. Олиготрофные: малое содержание питательных веществ, малая продукция органического вещества;
8. Мезотрофные: средние условия питания, средняя величина органического вещества;
9. Евтрофные: большое поступление питательных веществ, повышенная продукция органического вещества, избыток кислорода в эпилимнионе и его дефицит в гиполимнионе, небольшие водоемы степной зоны;
10. Дистрофные: избыточное содержание органики, продукты окисления органического вещества опасны для гидробионтов, органогенные (болотные) озера.

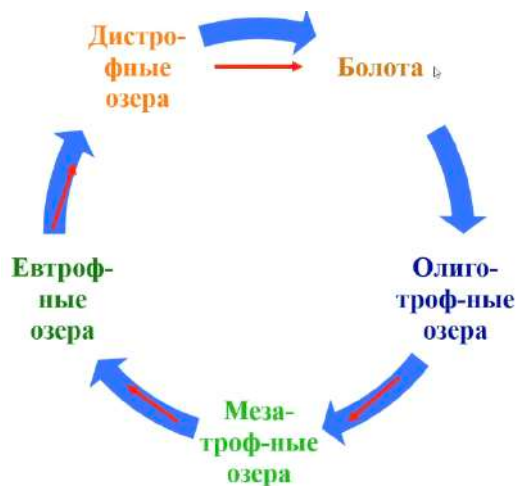


Рис. 16.38. Естественная эволюция озер.

Меромиктические озера – уникальные водные объекты. Меромиктия – состояние постоянной химической стратификации озера, характеризующееся отсутствием полного перемешивания водной толщи в течение года.



Рис. 16.39. Схематическое изображение меромиктического озера.



Рис. 16.40. Разнообразие изучаемых озер.

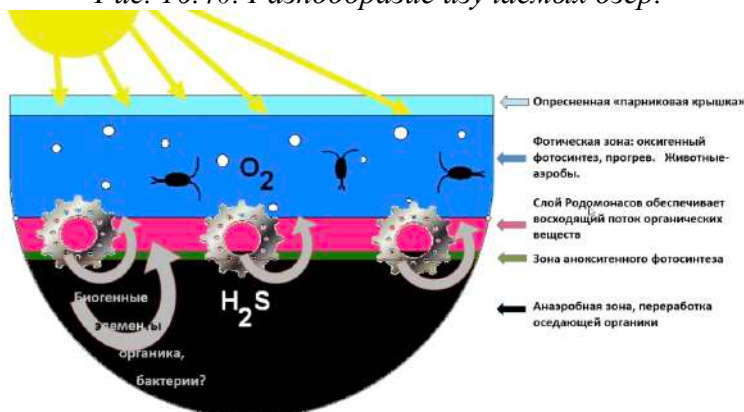


Рис. 16.41. Схема экосистемы отделяющегося водоема.

Проблема озера Арал. В 1950-х годах Аральское море было четвертым по площади озером мира, занимая около 68 000 км², его длина составляла 426 км, ширина – 284 км, наибольшая глубина – 68 км. В 1989 г. море распалось на два изолированных водоема – Северное (Малое) и южное (Большое) Аральское море. В 2003 г. Южное Аральское море разделилось на западную и восточную части. С 1960 по 2002 г. уровень Арала упал на 22 м.



Рис. 16.42. Изменение оз. Арал.

Из-за резкого уменьшения стока рек прекратились весенние паводки, снабжавшие плавни низовий Амударьи и Сырдарьи пресной водой и плодородными отложениями. Число обитавших видов рыб сократилось с 32 до 6. Результат повышения уровня солености воды – потери нерестилищ и кормовых участков.

В рамках проекта РРССАМ в 2003-2005 годах Казахстан построил Кокаральскую дамбу с гидротехническим затвором. Предполагается, что водой будет покрыта территория площадью 870 км², и это позволит восстановить флору и фауну Приаралья. Кокаральская плотина – плотина, пересекающая пролив Берга между Северным

Аральским морем (Малое море) и Южным Аральским морем (Большое море) вблизи урочища Кокарал в Аральском районе Кызылординской области Казахстана, плотина предназначена для регулирования уровня воды в Малом море, на ней построено водопропускное сооружение с девятью водосбросами с пропускной способностью $600 \text{ м}^3/\text{с}$, предназначенное для ее защиты от разрушения путем сброса излишком воды в Южный Арал.

Уже в 2006 г., ранее, чем ожидали ученые, было зафиксировано увеличение уровня. Снизилась минерализация воды – с 23 до 17 граммов на литр, Количество воды и ее видовое разнообразие выросло, стал изменяться микроклимат. Расстояние от Аральска до моря сократилось со 100 до 25 км. Плотина приостановила приток вод Сырдарьи в Южное море и ускорила его высыхание.

Лекция 17. Гидрология водохранилищ

Назначение и типы водохранилищ. Основные характеристики водохранилищ

Водохранилище – искусственный водоем, созданный для накопления и дальнейшего использования воды.

Пруды создаются для накопления воды, но, в отличие от водохранилищ, не служат для активного регулирования стока, их площадь водной поверхности не превышает 1 км², а суммарный объем воды составляет менее 1 млн. м³.

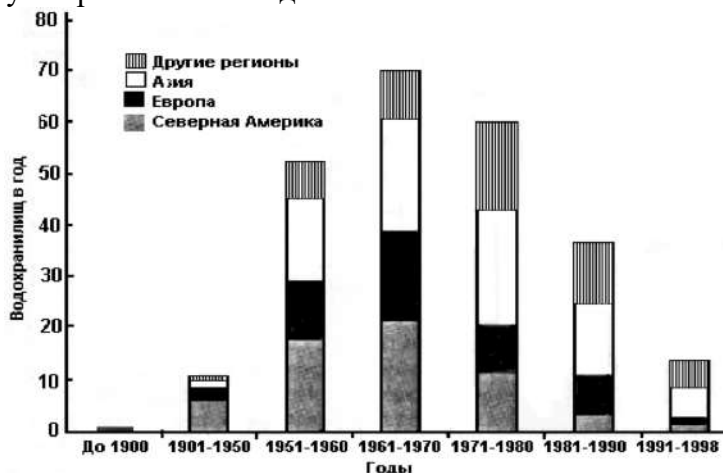


Рис. 17.1. Строительство крупных водохранилищ в XX в. (объемом более 0,1 км³).

Назначение водохранилищ:

11. Водоснабжение;
12. Энергетическое;
13. Ирригационное;
14. Противопаводковое;
15. Воднотранспортное;
16. Рекреационное.

Сравнивая доли выработки электростанции в мире (2003 г.), становится ясно, что наибольшее значение принадлежит ТЭС (~62%), далее идут ГЭС (20%), АЭС (17%) и прочее (1%). Из всех существующих типов электростанций именно ГЭС являются наиболее маневренными и способны при необходимости существенно увеличить объемы выработки в считанные минуты, покрывая пиковые нагрузки. Для тепловых станций этот показатель измеряется часами, а для атомных – целыми сутками.

На территории России работают 102 ГЭС мощностью 100 МВт. Общая установленная мощность гидроагрегатов на ГЭС составляет примерно 45 млн кВт (5 место в мире), а выработка – порядка 165 млрд кВт/год (5 место в мире). Доля ГЭС в общем объеме производства энергии не превышает 21%. По экономическому потенциалу гидроресурсов Россия занимает второе место в мире (~852 млрд кВт, после Китая). По степени освоения (20%) уступает всем развитым странам мира и развивающимся государствам (Франция, Швейцария – 70%, США и Бразилия – 50%).

Себестоимость выработки электроэнергии на ГЭС во времена СССР была в среднем в 8-9 раз меньше, чем на ТЭС, в настоящее время из-за подорожания топлива разница в себестоимости выросла и составляет уже 12-13 раз.

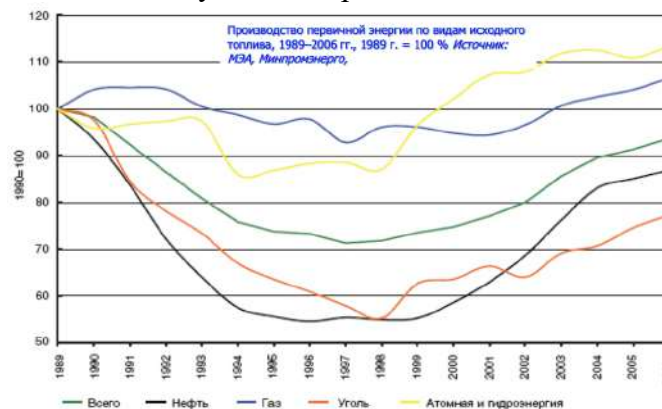


Рис. 17.2. Водохранилища и энергетика.

Типы водохранилищ по морфологии их ложа:

17. Долинные – водохранилища, ложем которых служит часть речной долины: занимают часть речной долины, возникают при сооружении плотины, существует уклон водной поверхности, глубина возрастает к плотине. Делятся на русловые и пойменно-русловые;

18. Котловинные – подпруженные (зарегулированные) озера и водохранилища, расположенные в изолированных низинах и впадинах, в отгороженных с помощью дамб от моря заливах, лиманах, лагунах, а также в искусственных выемках (карьерах, копанях): подпруженные озера, водохранилища в зеленых изолированных углублениях земной поверхности, водоемы в лагунах и лиманах, отгороженные дамбами от моря, пруды (площадь меньше 1 км²).

По способу наполнения водохранилища делятся на запрудные и наливные

Географические типы водохранилищ:

19. Горные;
20. Предгорные;
21. Равнинные;
22. Приморские.

Отличия водохранилищ по создаваемому напору:

Географический тип водохранилищ	Напор, м
Горные	> 100
Предгорные	30 – 100
Равнинные	5 – 30
приморские	< 5



Рис.17.3. Водохранилища в бассейне Волги. Московский каскад.

Положение водохранилищ на одной реке:

- 23. Верховное;
- 24. Низовое;
- 25. Каскад.



Рис. 17.4. Карта водохранилищ на территории России.

Водный режим водохранилищ. Влияние водохранилищ на окружающую среду

Характер регулирования речного стока водохранилищами зависит от назначения водоема, соотношения между объемом водохранилища и объемом притока речных вод. Так, выделяется:

- Многолетнее;
- Сезонное;
- Недельное;
- Суточное регулирование.

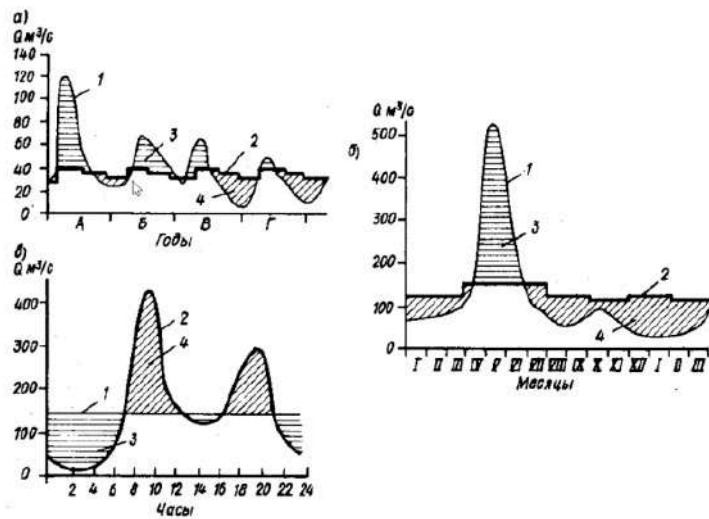


Рис. 17.5. Многолетнее, сезонное (б), суточное (в) регулирование: 1 - естественные Q , 2 - после зарегулирования, 3 – объем накопления в многоводные, 4 – объем сброски в маловодные периоды времени.

Морфометрические характеристики водохранилищ совпадают с характеристиками озер, важнейшие – площадь и объем.

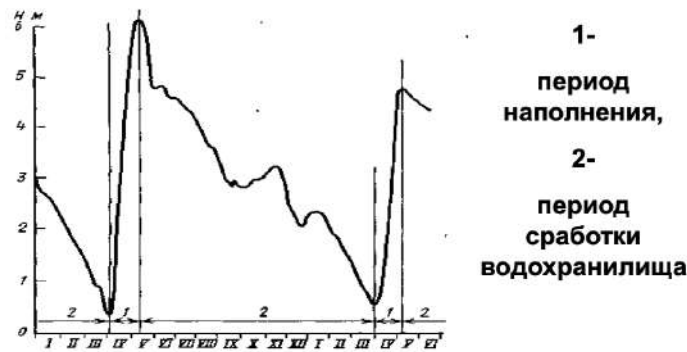


Рис. 17.6. Характерный ход уровней воды в водохранилище.



Рис. 17.7. Колебания уровня воды в водохранилище.

Объемы воды в водохранилище:

- Полный объем V :

$$V_{\Pi} = V + V_{\text{М}}$$

- Полезный объем V_{Π} :

$$V_{\Pi} = V - V_{\text{М}} \quad (17.1)$$

- Мертвый объем $V_{\text{М}}$:
- Резервный объем.

$$V_{\text{р}} = V_{\text{ФПУ}} - V_{\text{НПУ}} \quad (17.2)$$



Рис. 17.8. Схема деления объема водохранилища на характерные зоны диспетчерского графика.

Особенности водного баланса водохранилищ в зоне умеренного климата:

- В приходной части баланса (ПЧБ) преобладает приток речных вод;
- Осадки формируют не более 2-3% ПЧБ;
- В расходной части баланса (РЧБ) доминирует сброс воды в нижний бьеф;
- На испарение приходится не более 10% РЧБ.

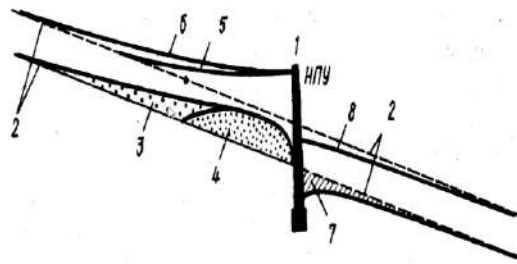
Интенсивность водообмена в водохранилищах:

- Коэффициент условного водообмена: $K_{\text{в}} = 1 - 10 \text{ год}^{-1}$
- Период водообмена: $\tau = K_{\text{в}}^{-1} = 10 - 12$ месяцев
- Для наиболее крупных водохранилищ: $\tau = 4 - 6$ месяцев (вдхр. Насера, Кариба, Братское).

Типы течений в водохранилищах:

- Стоковые;
- Фрикционные (ветровые);
- Компенсационные;
- Плотностные.

К причинам изменения во времени объема водохранилищ относятся заиление (отложение в водоеме мелких фракций взвешенных наносов: рис. 17.9-4) и занесение (аккумуляция в водоеме влекомых наносов: рис.17.9-3).



1- плотина, 2- отметки дна до и после заиления, 5,6 – отметки НПУ до и после заиления водоема

Рис. 17.9. Графическое изображение рассматриваемых характеристик.

Влияние водохранилищ на реки и природную среду:

- Изменение величины речного стока;
- Изменение внутригодового распределения вечногo стока;
- Изменение режима подземных вод;
- Гидробиологические изменения;
- Микроклиматические изменения;
- Тектонические изменения.

Динамические изменения:

- Уменьшается скорость потока выше и возрастает ниже плотины;
- Замедляется период водообмена;
- В 1980 г. замедление водообмена достигло 5,2 раз.

Изменения речного стока:

- В зонах недостаточного увлажнения уменьшается сток воды;
- Уменьшается сток наносов;
- Снижается содержание в воде химических веществ, в т. ч. токсичных веществ;
- Увеличивается содержание биологических субстанций (биомасса);
- Сложные изменения стока теплоты.

Изменение внутригодового распределения стока:

- Увеличение меженного стока;

- Уменьшение максимальных расходов воды;
- Увеличение зимних и понижение летних температур воды;
- Уменьшение меженного стока взвешенных наносов;
- Увеличение минерализации воды в период половодья.

Особенности влияния водохранилищ на речной сток:

- Регулирование стока влияет на величину речного стока;
- Максимальное воздействие водохранилища оказывают на внутригодовое распределение стока;
- Степень влияния водохранилищ на речной сток зависит от типа регулирования стока.

Степень влияния водохранилищ на средний многолетний сток воды в различных природных условиях:

Регион	Степень изменения стока воды, %
Север ЕТР	0,8-1,0
Юг ЕТР	10-30
Средняя Азия	70-80

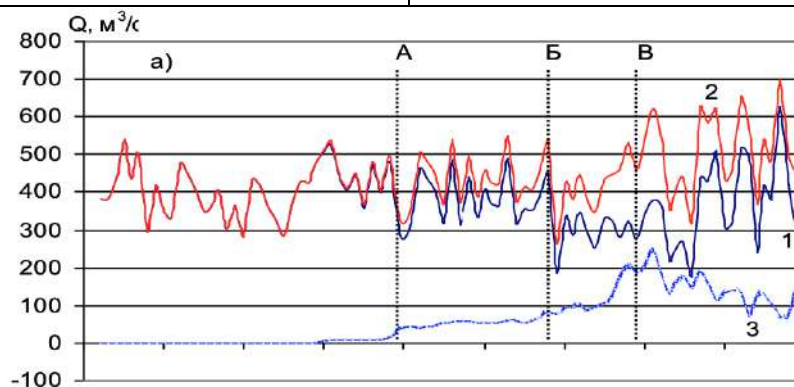


Рис. 17.10. Изменение среднегодовых расходов воды р. Кубань у х. Тихвинского:

1 – фактические среднегодовые расходы воды; 2 – условно естественные расходы воды; 3 – изменение стока воды Кубани вследствие хозяйственной деятельности. Годы сооружения: А – Невинномысского канала, Б – Большого Ставропольского канала; В – Краснодарского водохранилища.

Водохранилища ГЭС

Водохранилища имеют комплексное значение и влияют на разнообразные области деятельности человека:

1. Энергетика: запас воды, аккумулированный в водохранилищах, предназначенся в первую очередь для гарантированной выработки электроэнергии на ГЭС в зависимости от объема накапливаемой воды. Создание водохранилищ дает возможность максимально использовать проектную мощность

гидроэлектростанций. Например, на Рыбинском водохранилище вырабатывается от 0,8 до 1,3 млн. киловатт часов электроэнергии.

2. Транспорт: созданные при гидроузлах комплексного значения водохранилища дают возможность увеличить количество транспортных и пассажирских речных перевозок, т. к. на водохранилищах обеспечиваются стабильные в течение всей навигации гарантированные судоходные глубины. Свыше 60% всего объема перевозок по внутренним водным путям страны осуществляется водохранилищам.
3. Ирригация: построенные в бассейнах рек водохранилища ГЭС создают необходимые условия для орошения сельскохозяйственных земель. Регулирование стока рек помогает оросить около 240 млн. га земли, которая дает половину сельскохозяйственной продукции мира. Примером являются водохранилища в бассейнах рек Волги, Днепра, Амударьи, Сырдарьи.
4. Экология:
 - Инженерная защита ценных сельскохозяйственных земель: при создании водохранилищ выполняется инженерная защита сельскохозяйственных земель, что заметно снижает возможный ущерб от затоплений. Гидроузлы на ГЭС позволяют регулировать и контролировать сток воды, ликвидируя катастрофические наводнения, маловодья, сели.
 - Борьба с загрязнениями: большие массивы воды в водохранилищах позволяют более полно разбавлять загрязнения: изымать и переводить в донные отложения водные ингредиенты (тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты), поступающие в реки со сточными водами промышленных и коммунальных предприятий с сельхоз угодных и урбанизированных территорий. Качество воды в водохранилищах выше по показателям прозрачности, цветности, содержания взвешенных веществ и количеству сапрофитных бактерий.
 - Водоснабжение: водохранилища, созданные при гидроузлах комплексного назначения с соблюдением требований Санитарных правил, также используются как источник хозяйственно-питьевой воды и водоснабжения.
 - Рыболовство: водохранилища создают условия для разведения и ловли рыбы, причем уловы рыбы на водохранилищах на порядок выше, чем на речных участках. На Рыбинском водохранилище вылавливается в среднем 1466 т. рыбы.
 - Туризм: водохранилища являются одним из привлекательных мест отдыха – на многих благоустроены пляжи, проводятся парусные регаты, дайвинг, теплоходные экскурсии (Волжские водохранилища).

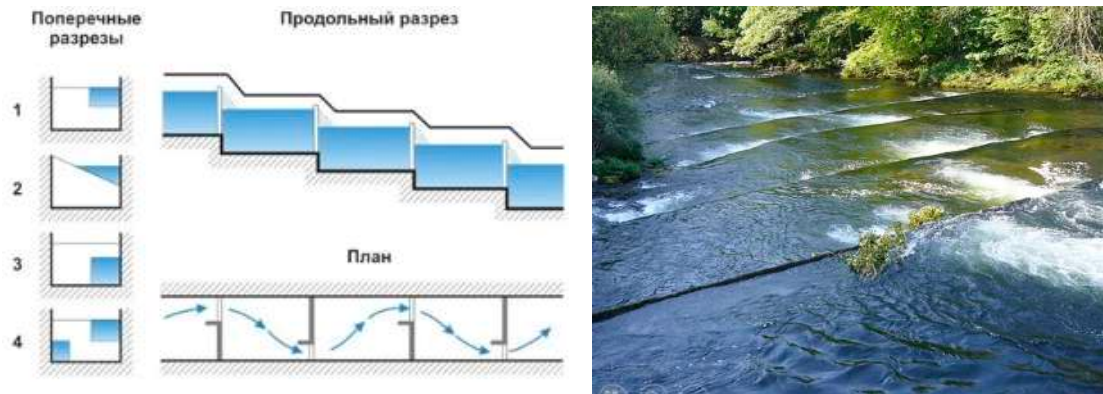


Рис. 17.11. Лестничные рыбоходы (позволяют рыбам пройти на нерест).

Опасные процессы и выгоды, связанные с водоснабжением:

Риски	Выгоды
Потеря земель для с/х использования	Решение проблем водоснабжения
Снижение стока	Наличие дешевой энергии
Потопление местности	Предупреждение заторов
Размыв берегов и дна	Надежность работы водного транспорта
Остепнение пойм ниже ГЭС	Рекреационные удобства
Проблемы нереста проходных рыб	Повышение биопродуктивности
	Защита от наводнений

Лекция 18. Гидрология морей и океанов

Мировой океан и его части

Мировой океан – непрерывная водная оболочка планеты, имеющая общие черты уровня, теплового и солевого режима:

- Занимает 71% земной поверхности;
- Содержит 96,5% воды гидросферы.

К элементам Мирового океана относятся океаны, моря и проливы. Океан – часть Мирового океана между материками, обладающая самостоятельной системой циркуляции вод и спецификой гидрологического режима. Выделяют:

- Тихий;
- Атлантический;
- Индийский
- Северный Ледовитый.



Рис. 18.1. Границы океанов и морей.

Сравнение океанов Земли:

Характеристики	Океаны				
	Атлантический	Индийский	Тихий	Северный Ледовитый	Мировой
Площадь поверхности, млн. км ²	92	76	179	15	361
Объем, млн. км ³	330	283	710	18	1341
Средняя глубина, м	3597	3711	3976	1225	3711

Наибольшая глубина, м (место измерения)	8742 (желоб Пуэрто-Рико)	7209 (Яванский желоб)	11022 (Марианский желоб)	5527 (Гренландское море)	11022 (Марианский желоб)
---	--------------------------	-----------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Море – сравнительно небольшая обособленная часть океана, обладающая особым гидрологическим режимом. Типы морей:

- Внутренние: имеют затрудненную связь с океаном и делятся на внутриматериковые (Азовское, Белое, Балтийское, Черное) и межматериковые (Средиземное, Красное).;
- Крайние: отделены от океана островами или вдаются в сушу. Имеют свободную связь с океаном. Среди примеров: Баренцево, Чукотское, Северное, Норвежское моря;
- Межостровные: расположены среди крупных островов и архипелагов. Примеры, море Фиджи, Банда, Сулу, Саву, Флорес.

Самое большое по площади море Мирового океана и самое глубокое — Филиппинское (5,7 млн. км², глубина до 10265 м). Объем этого моря на 30% больше объема всего Северного Ледовитого океана. Крупнейшие по площади моря в Тихом океане (после Филиппинского) — Коралловое и Южно- Китайское, в Атлантическом океане – Уэдделла и Карибское, в Индийском – Аравийское, а в Северном Ледовитом — Баренцево и Норвежское.

Особые части океанов и морей:

- Залив – часть моря или океана, вдающаяся в сушу и не имеющая собственного гидрологического режима. Проблемы терминологии: Персидский и Гудзонов залив – моря? Море Бофорта – залив? Саргассово море – не море?
- Бухта – небольшой залив, отчлененный островами и мысами от моря или океана, который не имеет обособленный гидрологический режим.



Рис. 18.2. Бухты Севастополя.

- Лиман – залив, отделенный от моря косой, в которой есть узкий пролив. Гидрологический режим часто обусловлен речными факторами.



Рис. 18.3. Днестровский лиман. Снимок со спутника Landsat.

- Лагуна, губа – залив, глубоко вдающийся в сушу, в который впадает река. Водоем часто относят к устьям рек.



Рис. 13.4. Обская губа Карского моря.

- Фьорд – узкий, глубокий залив с высокими берегами – ложе древнего ледника.

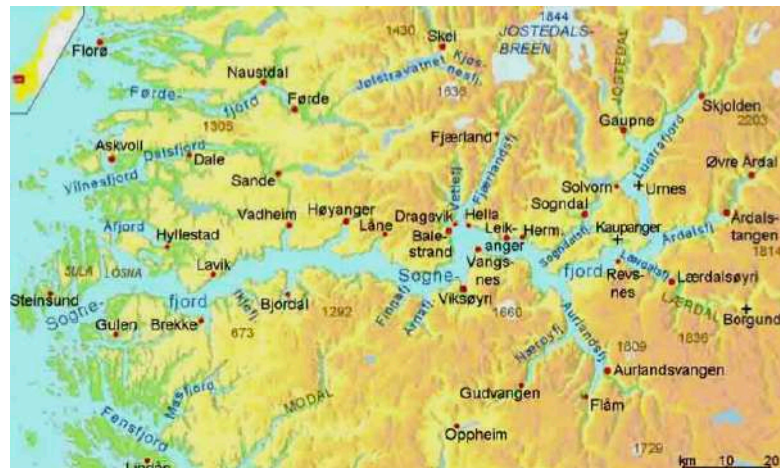


Рис. 13.5. Согне-фьорд.

- Пролив – относительно узкий водный объект между участками суши, соединяющий отдельные океаны и моря.



Рис. 13.6. Гибралтарский пролив.

Рельеф дна Мирового океана

Строение земной коры над океанами:

- Слой осадочный пород: 0,1-1,0 км (5 – под материками);
- Гранитный слой: 0 (10-15 – под материками);
- Базальтовый слой: до 5 км (15 – под материками).



Рис. 13.7. Океанская и континентальная кора.

Главные элементы рельефа дна океана:

- Океанические желоба: >6000 м;
- Ложе океана: 2500-6000 м;
- Подводная окраина материков: <2500 м.

Гипсографическая кривая – функция распределения глубин океана и высот земной поверхности. По вертикальной оси (рис. 13.8) откладывается высота рельефа, по горизонтальной – доля поверхности, высота рельефа которой больше указанной. Часть кривой, расположенной ниже уровня моря, называется батиграфической кривой.

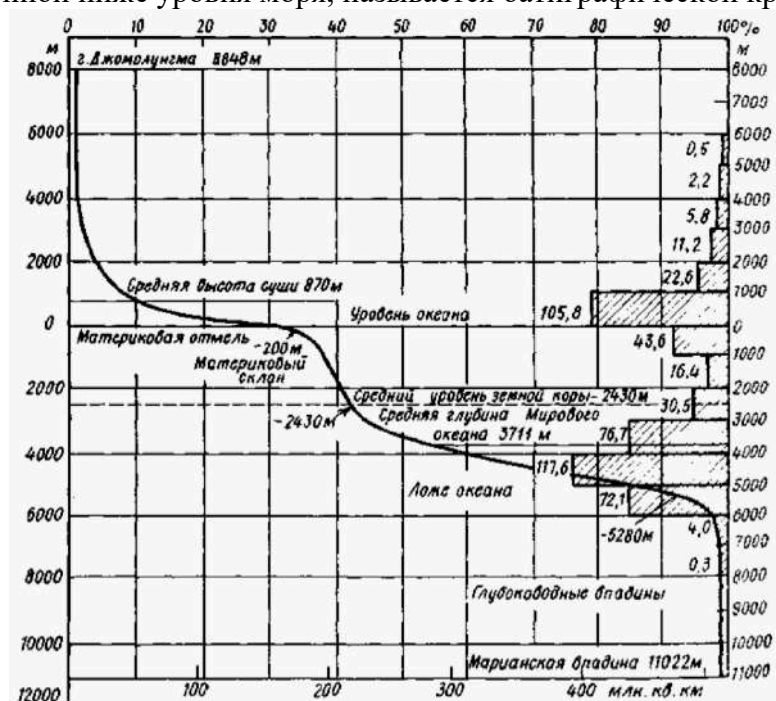


Рис. 13.8. Гипсографическая кривая.

Элементы рельефа подводной окраины материков:

- Шельф: <200 м: занимает до 40% площади подводных окраин, уклоны дна малы.
- Склон: 200-2000 м: имеет большие (до 300) уклоны, на нем возможны подводные каньоны;
- Подножие: 2000-2500 м: область накопления осадков, местоположение конусов выноса.

Положительные формы рельефа ложа океана:

- Срединно-океанические хребты;
- Подводные плато;
- Подводные горы (гайоты).

Отрицательные формы рельефа ложа океана:

- Котловины;
- Ложбины;
- Океанические желоба;
- Рифтовые долины;
- Трансформные разломы.

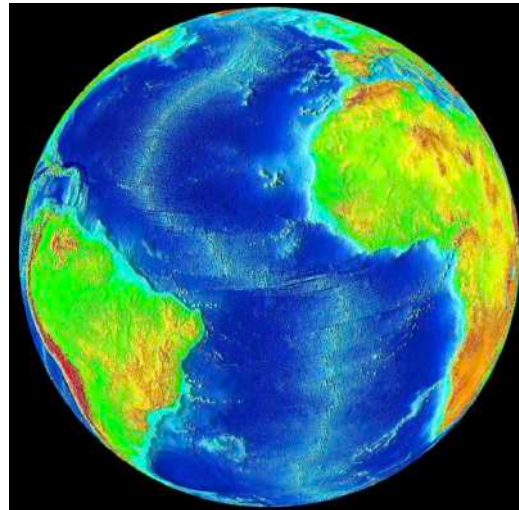


Рис. 18.9. Рельеф дна Атлантического океана.

Соленость воды и методы ее определения

Состав растворенных веществ в морской воде:

- Макроэлементы – определяют соленость воды;
- Микроэлементы;

- Биогенные вещества – характеризуют условия питания организмов (азот, фосфор, кремний);
- Растворенные газы.

Еще раз о солености:

- Соленость S – содержание [г/кг, ‰ (промилле)] минеральных веществ в 1 кг морской воды соленость воды [‰] приблизительно;
- Соответствует минерализации воды M [мг/л], $S \approx 10^{-3} M$.
- Неравенство S и M связано с влиянием на массу растворенных веществ m изменений плотности воды ρ (при постоянном объеме воды V) ($m = \rho V$).

Методы определения солености:

- Измерение электропроводности C , а затем S , поскольку $S = f(C)$;
- Измерение плотности ρ , а затем S , т.к. S и ρ связаны уравнением состояния (применялся в XIX в., неточен);
- Полный химический анализ (трудоемок);
- Оценка содержания хлора (практически был удобен до 1970-х годов).

Определение солености морской воды по хлорности (содержание в морской воде галогенов, эквивалентное содержанию хлора) – формула Кнудсена:

$$S[\text{‰}] = 0,030 + 1,805 * Cl[\text{‰}] \quad (18.1)$$

или

$$S[\text{‰}] = 1,80655 * Cl[\text{‰}] \quad (18.2)$$

анионы (‰)		катионы (‰)	
• Cl ⁻	19,35	• Na ⁺	10,76
• SO ₄ ²⁻	2,70	• Mg ²⁺	1,30
• HCO ₃ ⁻	0,14	• Ca ²⁺	0,41
• Br ⁻	0,07	• K ⁺	0,39
• H ₃ BO ₃ ⁻	0,03	• Sr ²⁺	0,01
• Всего	22,29	• Всего	12,87
Сумма – 35,16 ‰			

Рис.18.10. Ионный состав вод океана (для солености $S = 35,16\text{‰}$).



Рис.18.11. Солевой состав вод океана (в %).

Закон постоянства солевого состава морской воды (закон Дитмара): солевой состав морских вод одинаков во всех частях Мирового океана (при любой солености).

Распределение солености в Мировом океане

Факторы изменения солености:

- Зональная разность между слоем осадков и испарения ($x - z$);
- Зональное изменение слоя материкового стока u ;
- Сезонные изменения составляющих водного и теплового баланса;
- Региональное влияние процессов таяния и образования льда;
- Региональное влияние морских течений;
- Локальное воздействие притока речных вод.

Красные области на рис. 18.12 показывают, где осадки сильно меньше испарения. Синие области – наоборот. Если испарение превышает осадки, то можно ожидать повышенную соленость. Там, где осадки превышают испарение – ожидаем, что соленость будет понижена.

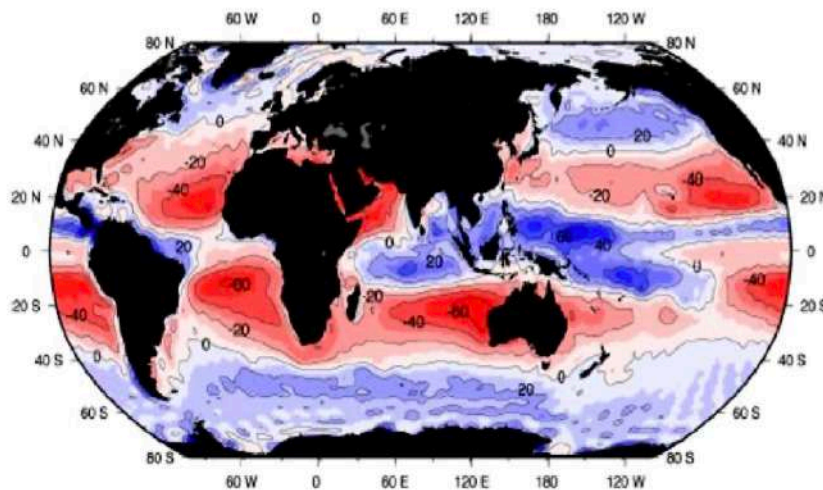


Рис. 18.12. Разность испарения осадков на поверхности океанов (см/год).

Закономерности меридионального распределения солености:

- Уменьшение S к полюсам (менее 34‰);

- Увеличение S к тропическим широтам;
- Максимум S в тропиках (36-37‰);
- Минимум S в экваториальной зоне (34-35,5‰).

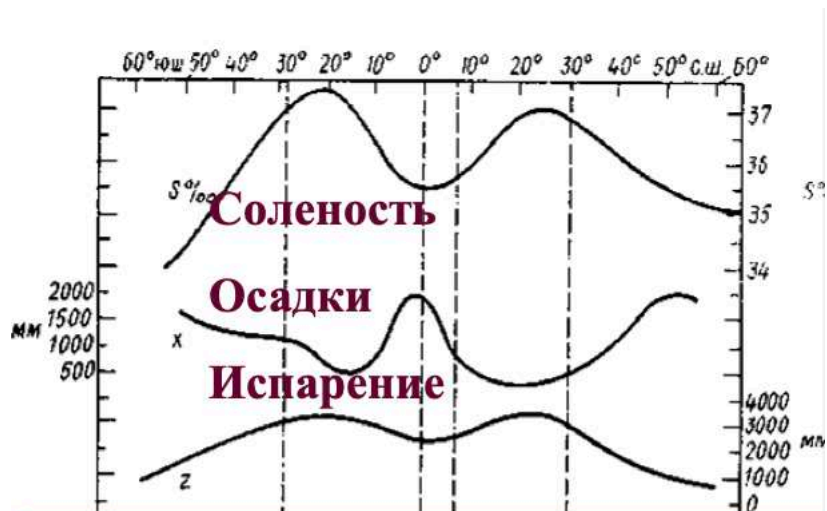


Рис. 18.13. Графическое изображение рассматриваемых закономерностей. Азональные факторы распределения солености:

- Увеличение солености у западных берегов материков – осолоняющее влияние морских течений;
- Уменьшение солености у восточных берегов материков – опресняющее влияние морских течений;
- Уменьшение солености в районах впадения крупных рек – опресняющий эффект пресных вод;
- Изменение солености в полярных широтах.



Рис. 18.14. Соленость (‰) поверхностного слоя некоторых внутренних морей.

Факторы вертикального распределения солености:

- Широтные различия осадков и испарения (поверхностный слой);
- Процессы перемешивания (верхние 300 м);
- Морские течения (адвекция на разных глубинах);
- Водообмен с внутренними морями (Средиземным, Красным).

Распределение солености по глубине:

- Величина S максимальна в поверхностных слоях;
- В основной толще морской воды идет чередование вод пониженной и повышенной солености;
- Соленость у дна в открытом океане 34,6-34,9 ‰.

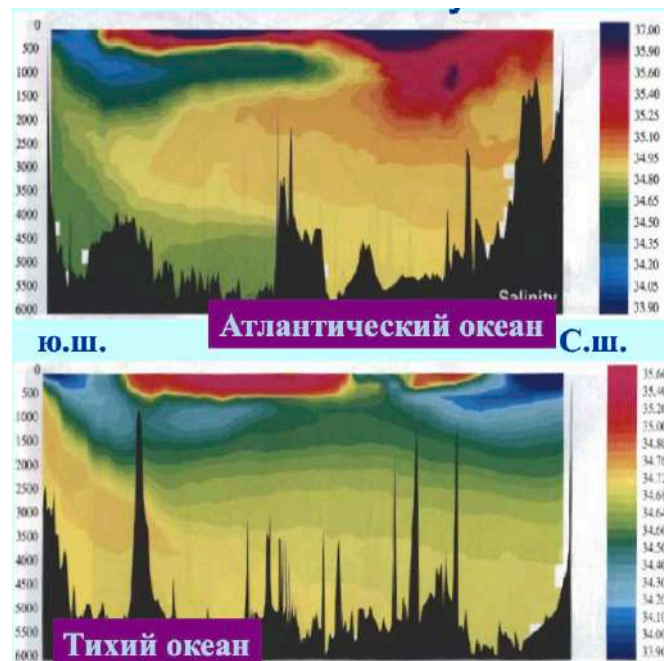


Рис. 18.15. Распределение солености по глубине.

Распределение температуры воды в Мировом океане

Факторы термического режима океана:

- Зональное распределение притока солнечной радиации;
- Испарение (при этом вода отдает тепло);
- Теплообмен с атмосферой (в зависимости от разницы температур вода-воздух);
- Принос (адвекция) тепла течениями
- Тепловой сток рек;
- Скрытая теплота фазовых переходов сезонные изменения.

Важные характеристики:

- Средняя температура поверхности океана: 17,5°C;
- Средняя температура воздуха: 14,5°C;
- Средняя температура всего объема Мирового океана: 3,8°C;
- Температура замерзания воды при океанской солености: -1,8 – 1,9°C.

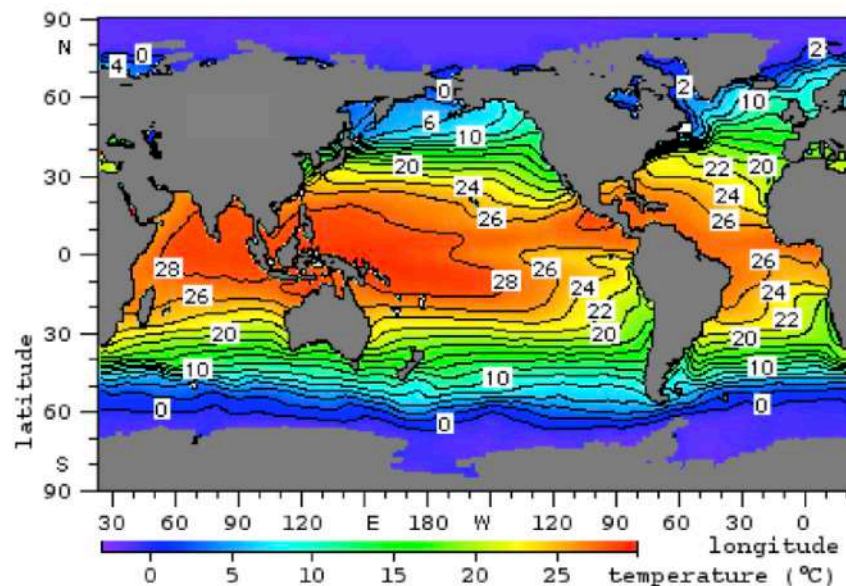


Рис. 18.16. Распределение поверхностной температуры Мирового океана.

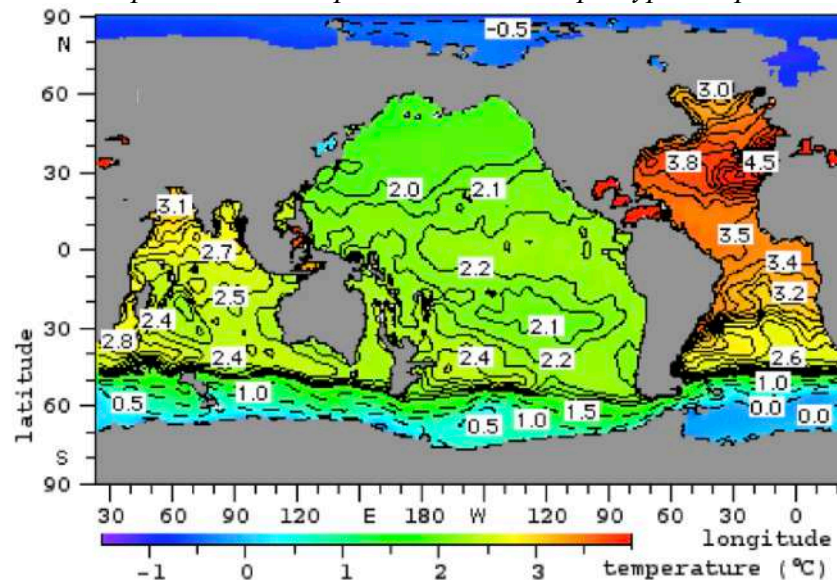


Рис. 18.17. Распределение температуры на глубине 2000 м в Мировом океане.

Закономерности распределения средней годовой поверхностной T по меридианам:

- Уменьшение T к полюсам (-1,0 – -1,8°C) – уменьшение притока солнечной радиации;

- Увеличение T к термическому экватору (27-28°C) – увеличение притока солнечной радиации;
- Максимум T – термический экватор располагается севернее экватора.

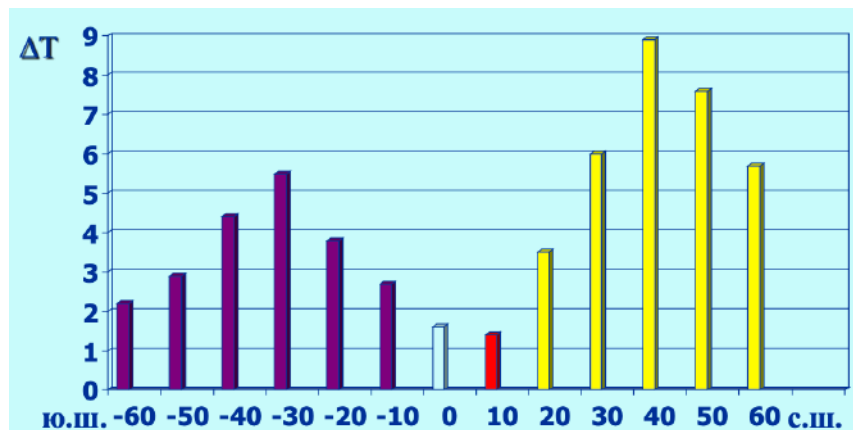


Рис. 18.18. Изменение разности ΔT (°C) между летней и зимней поверхностной температурой воды на разных широтах.

Закономерности распределения средней годовой температуры T по широтам:

Повышенные T у западных берегов материков	Отепляющий эффект морских течений
Пониженные T у восточных берегов материков	Охлаждающий эффект морских течений
Аномальное изменение T в районах впадения рек	Тепловой сток рек
Изменение T полярных широтах	Таяние и образование сезонных льдов

Рассмотрим рис 18.19: величина T практически повсеместно уменьшается ко дну – прямая температурная стратификация. Исключения – полярные районы (указаны стрелкой).

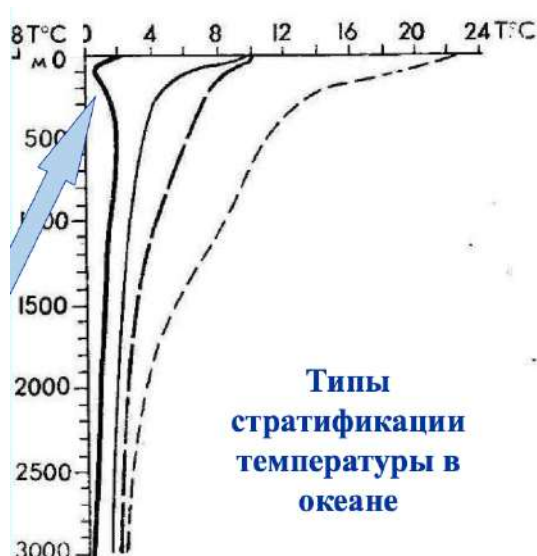


Рис. 18.19. Распределение температуры T по глубине.

Температурные слои Мирового океана:

- Слой сезонных изменений: $<200-400 \text{ м}, T > 17^\circ\text{C}$;
- Термоклин или слой скачка $T: 5 - 7 < T < 17^\circ\text{C}$;
- Слой глубинной холодной воды: $T < 5 - 7^\circ\text{C}$.

Влияние сгонно-нагонных явлений на аномалии температуры морской воды T : сгоны обуславливают подъем более холодных глубинных вод (апвеллинг), они – причина отрицательных аномалий T у западных берегов материков (Перу – Чилийская, Калифорнийская, Канарская, Бенгальская).

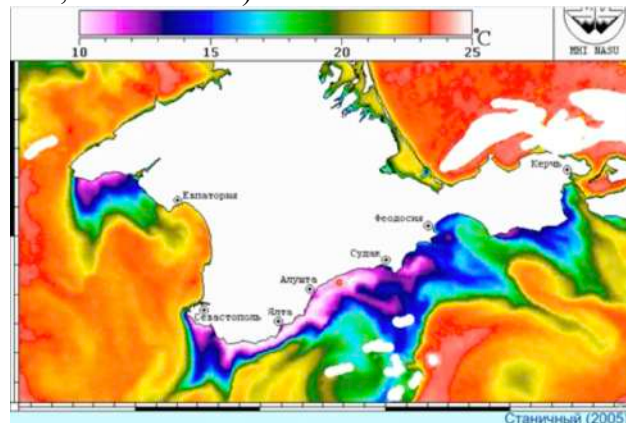


Рис. 18.20. Апвеллинг у берегов Крыма по спутниковым данным 10.07.2003. Положительные аномалии T (Гольфстрим, Куроисио) вызваны поступлением теплых вод из низких в высокие широты.

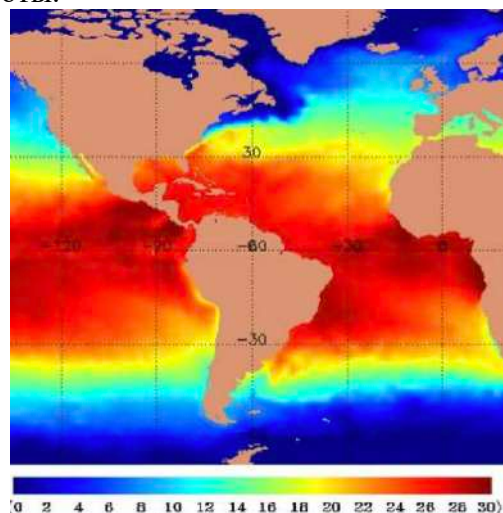


Рис. 18.21. Спутниковая карта температуры воды.

Плотность морской воды. Распределение плотности воды в Мировом океане

Плотность морской воды и производственные характеристики:

- Плотность воды $[\text{кг}/\text{м}^3]$ зависит от трех параметров. Ее связь с этими параметрами определяется уравнением состояния:

$$\rho = f(T, S, p); \quad (18.3)$$

- Условная плотность $[\text{кг}/\text{м}^3]$: $\sigma = \rho - 1000$;

- $\sigma_{T,S}$ – условная плотность при атмосферном давлении;
- $\sigma_{T,S,p}$ – условная плотность с учетом давления на горизонте наблюдения;
- При атмосферном давлении величина $\rho=1025-1033$ кг/м³, а $\sigma_T=25-33$ кг/м³.

Зависимость плотности ρ от давления, температуры и солёности:

- Увеличение глубины/давления на 1 км/1000 дбар приводит к увеличению ρ на 4,5-5 кг/м³;
- Увеличение солёности на 1‰ приводит к увеличению ρ на 0,8 кг/м³;
- Увеличение температуры на 10°C приводит к уменьшению ρ на 0,05-0,35 кг/м³ (чем теплее вода, тем больше уменьшение).

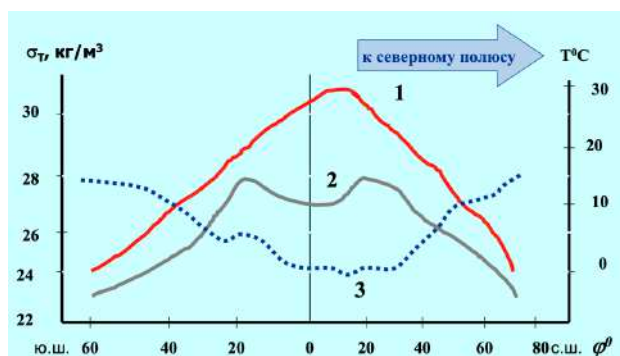


Рис. 18.22. Изменение температуры (1), солёности (2) и условной плотности (3) на меридиональном разрезе.

Самая тяжелая вода погружается у полюсов и уходит ближе к экватору. Там она в силу динамических причина начинает подниматься вверх (экваториальный квиллинг), а поверхностная вода от экватора в южном и северном полушариях движется к полюсам. В каждом из полушарий возникает циркуляция: с подъемом воды у экватора, течением от него к полюсу в верхнем слое, погружением у полюсов и потоком глубинных вод от полюсов к экватору (рис.18.23).

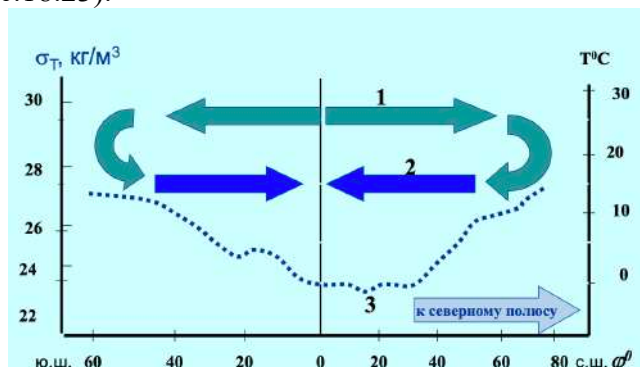


Рис. 18.23. Циркуляция вод на поверхностных (1) и придонных (2) слоях океана, обусловленная различиями условной плотности на поверхности (3).

Если рассматривать вертикальное распределение плотности (рис.18.24), то можно заметить, что плотность во всех океанах с глубиной повышается.

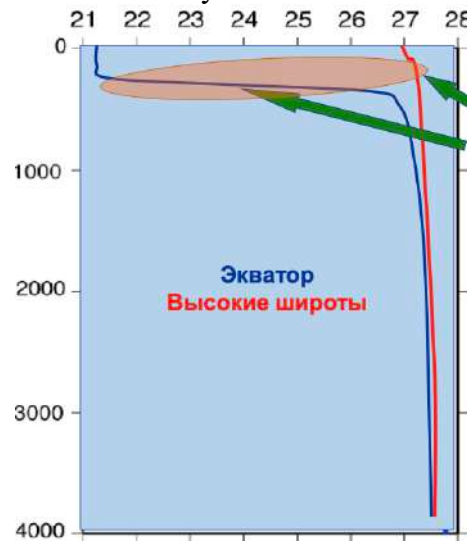


Рис. 18.24. Распределение условной плотности σ_T ($\text{кг}/\text{м}^3$) с глубиной. Стрелками обозначены пикноклины (слои скачка плотности).

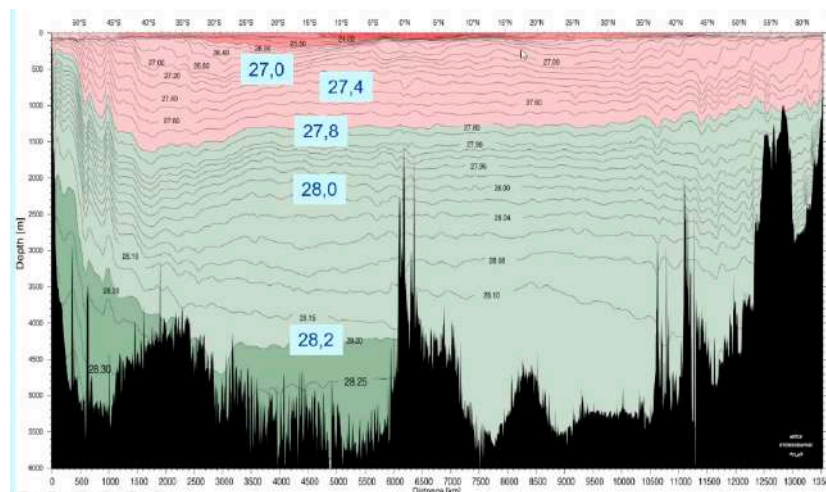


Рис. 18.25. Распределение условной плотности σ_T ($\text{г}/\text{см}^3$) с глубиной.

Ветровое волнение в океанах и морях. Волны

Причины возникновения волн:

- Воздействие ветра на поверхность воды
- Влияние силы трения на трансформацию поверхности воды при ее перемещении к берегу
- Наличие градиента давления и перепада уровней между частями водоема
- Деформации дна океана

- Воздействие поверхностных волн на появление устойчивых вертикальных движений слоев воды
- Влияние приливных сил

Выделяют два класса волн, поверхностные и внутренние. К основным элементам относятся:

- Вершина;
- Подошва;
- Длина λ [м];
- Высота h_v [м];
- Крутизна $\delta = h_v/\lambda$.

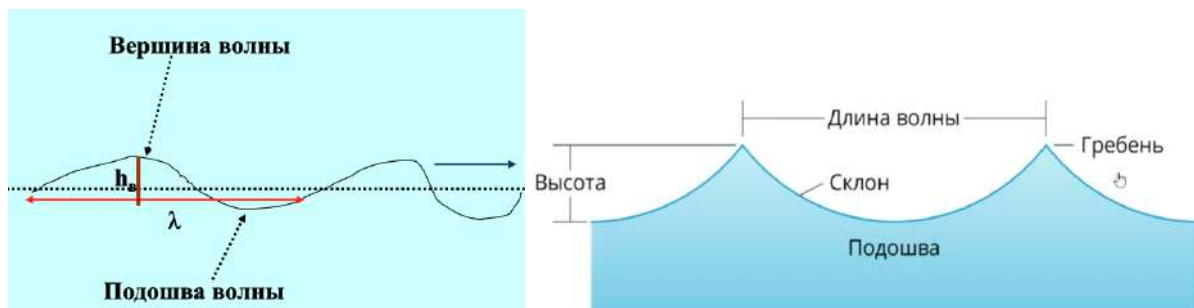


Рис. 18.26. Элементы волн.

К характеристикам движения волн относятся:

- τ [с] – время перемещения волны на расстояние λ (период волны);
- Фазовая скорость [м/с].

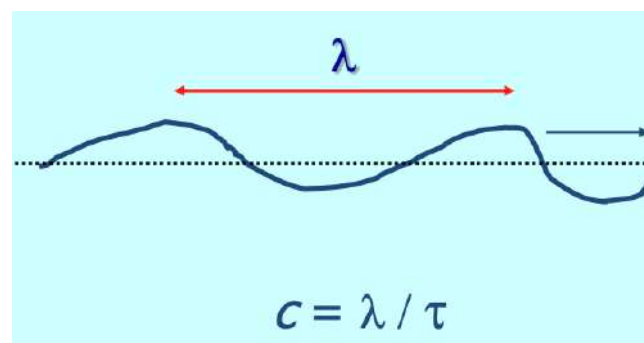


Рис. 18.27. Характеристики движения волн.

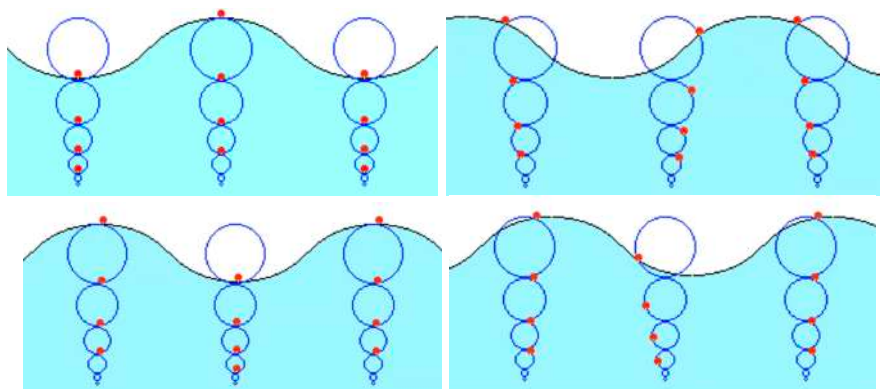


Рис. 18.28. Траектории частиц в волне (характерно для глубокого океана, когда волна не чувствует дна).

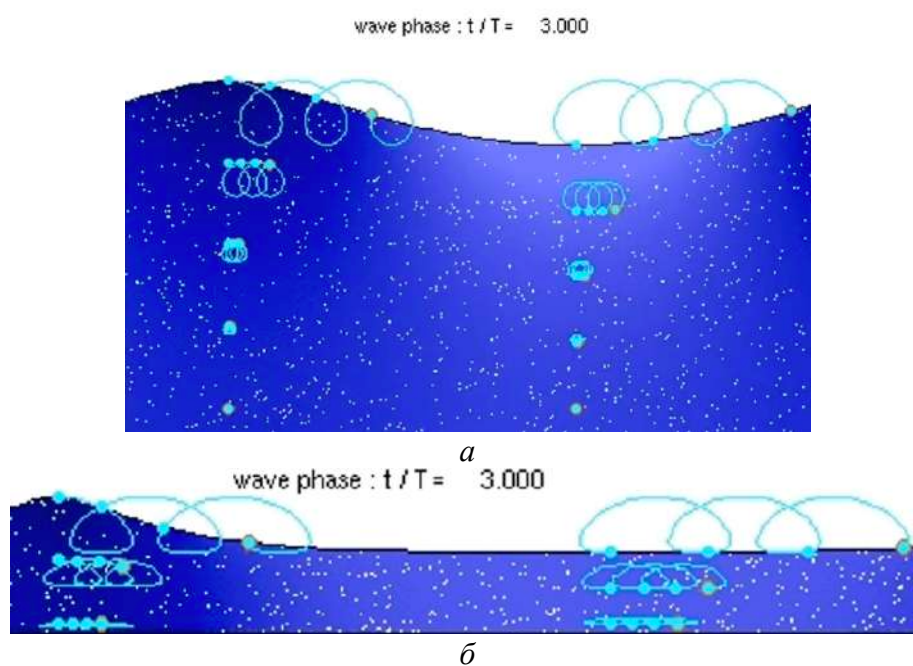


Рис. 18.29. Движение частиц в волне при действии ветра: глубокое море (а) и мелкое море (б).

Теперь можно сформировать два класса волн в соответствии с направлением их перемещения:

- Поступательные;
- Стоячие (частицы воды не совершают движений по круговым орбитам).

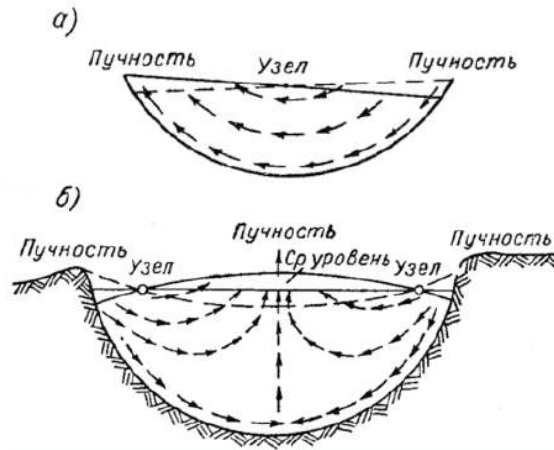


Рис. 18.30. Поступательные (а) и стоячие (б) волны.

В пучностях амплитуда колебания уровня наибольшая, частицы двигаются только по вертикали. В узлах колебания уровня отсутствуют, частицы двигаются только в горизонтальном направлении.

Наиболее важная для нас классификация волн – по их длине:

- Длинные ($\frac{\lambda}{h} > 2$) – приливные, сейсмические, их скорость:

$$c = \sqrt{gh}, \quad (18.5)$$

где g – ускорение свободного падения, λ – длина волны, h – глубина места.

- Короткие ($\frac{\lambda}{h} < 2$) – ветровые.



Рис. 18.31. Фронт волны и волновой луч.

По форме волны подразделяются на двумерные (отличаются по длине и высоте, одинаковы по фронту волны) и трехмерные (длина и высота волн изменяется по фронту волны).

Классификация по происхождению:

- Ветровые;

- Тектонические;
- Приливные;
- Барические;
- Сейшевые;
- Внутренние.

Общая характеристика ветровых волн: трехмерность, длина и высота волн зависят от скорости и продолжительности действия ветра, длины пути разгона. Максимальная величина – 30-35 м.

Высота волны, м	Оценка волнения - балл
0	штиль - 0
<0,25	слабое - 1
0,25-0,75	умеренное - 2
0,75-1,25	умеренное - 3
1,25-2,0	значительное - 4
2,0-3,5	значительное - 5
3,5-6,0	сильное - 6
6,0-8,5	сильное - 7
8,5-11,0	очень сильное - 8
> 11,0	исключительное - 9

Рис. 18.32. Шкала оценки волнения.

Волны-убийцы – гигантские одиночные волны до 20-30 м, минимум в 2 раза выше всех окружающих волн (блуждающая волна/волна-монстр/волна-разбойник).

Причинами деформации волн у берега могут быть трение при взаимодействии волны и берегового склона, отражение волн от берега, рефракция волн.

Следствия увеличения трения на пологом склоне выровненного берега:

- Увеличивается скорость перемещения гребня по сравнению с подошвой волны;
- Волна становится круче;
- Обрушение волны – прибой;
- Заплеск.



Рис.18.33. Волны у пологого берега (а) и прибой (б).

Следствия увеличения трения на пологом склоне при наличии крутого берега:

- Увеличивается скорость перемещения гребня по сравнению с подошвой волны
- Волна становится круче
- Обрушение волны – взброс
- Бурун (при наличии подводной гряды далеко от уреза)

Рефракция волн – адаптация фронта волн к линии неровного берега:

- Независимо от положения фронт волн в море волна у берега всегда параллельна урезу;

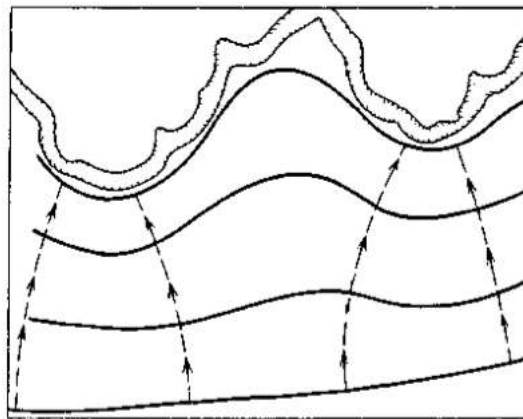


Рис. 18.34. Графическое изображение рассматриваемого случая.

- Разные участки фронта волн движутся с разными скоростями – выравнивание фронта:

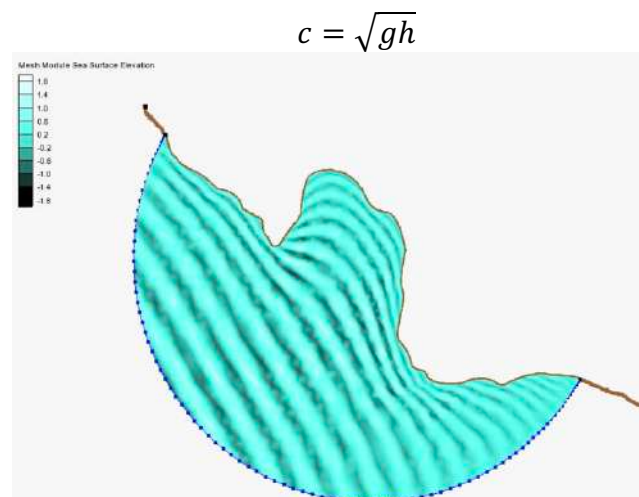


Рис. 18.35. Моделирование распространение волн у берега.

Штормовой нагон – поднятие уровня моря, вызванное переопределением масс воды под воздействием градиента атмосферного давления и напряжения ветра.

- Сгонно-нагонные явления особенно заметны в условиях мелководья у берегов и плоского побережья;
- Ветер со стороны берега вызывает осушение прибрежной части дна (сгон);
- Ветер со стороны водоема вызывает затопление прибрежной части суши (нагон);
- Нагон усиливается в устьях рек, под действием приливов, при наложении стоячей волны, падении атмосферного давления.

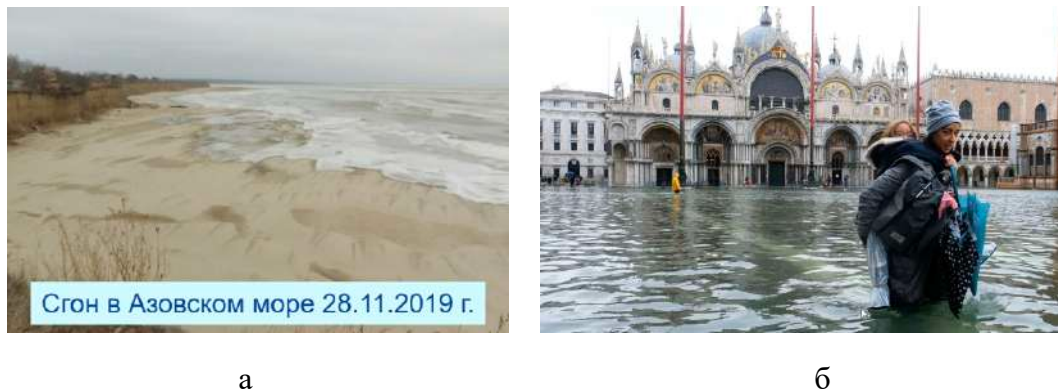


Рис. 18.36. Сгон (а) и нагон (б).

Цунами – тектонические волны.

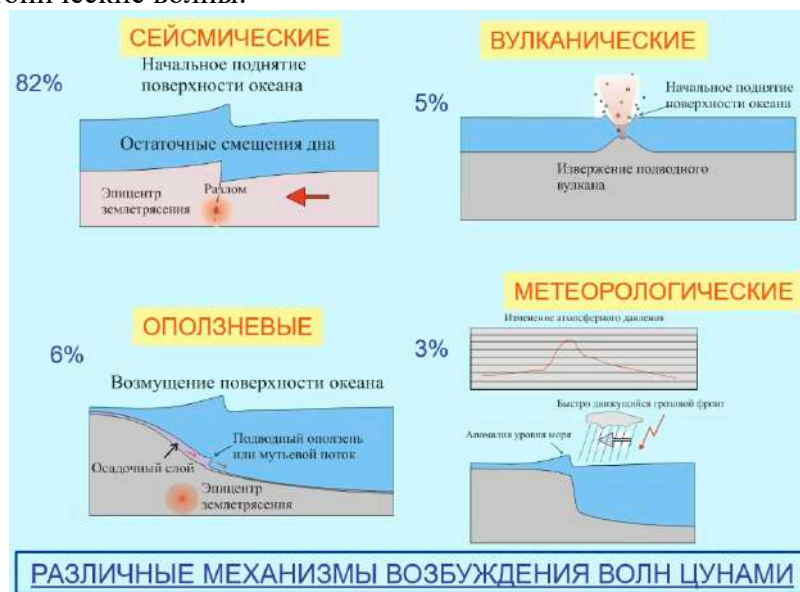


Рис. 18.36. Цунами в Мировом океане.

Сейсмические цунами:

- Высота: 0,1- 35 м, длина: 20–600 км;
- Период: 0,03 – 3,3 ч;
- В месте зарождения $h_b < 2$ м;

- Максимум она достигает у берега;

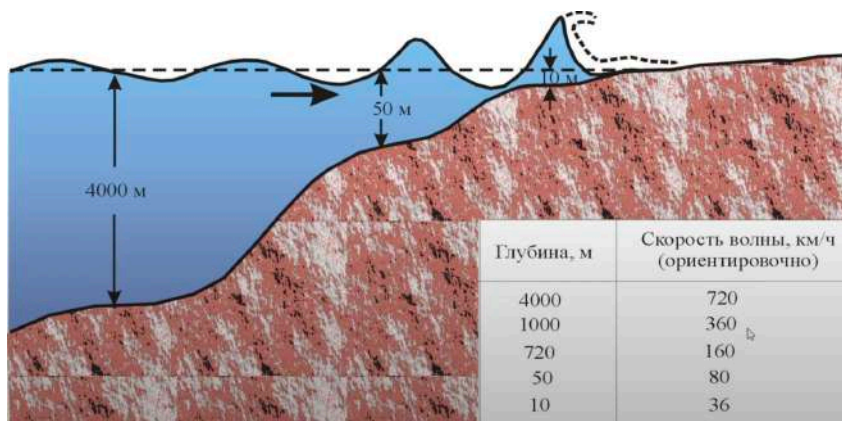


Рис. 18.36. Сейсмические цунами.

Лекция 19. Динамика океанов

Приливы в океанах и морях

Прилив – периодические колебания уровня воды у берегов (волны), обусловленные взаимодействием в системе Земля-Луна-Солнце.

Приливный уровень определяется равнодействующей (синие стрелки на рис. 19.1) двух сил: силой притяжения к Луне (красные стрелки) и центробежной силой вращения системы Земля-Луна вокруг общего центра масс (желтые стрелки), он находится внутри Земли на расстоянии $0,73$ ее радиуса от центра Земли ближе к Луне.

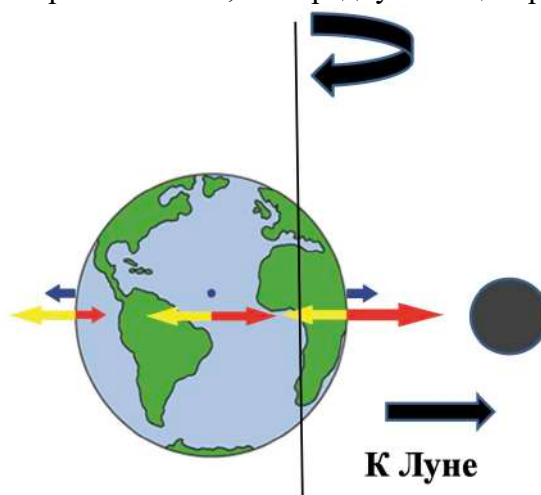


Рис. 19.1. Графическое изображение рассматриваемых случаев.

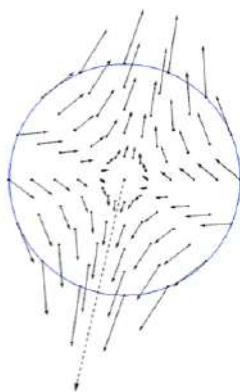


Рис. 19.2. Схема распределения приливообразующей силы на меридиональном сечении поверхности Земли.

Фазы прилива:

- Повышение – прилив;
- Понижение уровня – отлив;
- Максимальный уровень в конце прилива – полная вода;
- Минимальный уровень в конце отлива – малая вода;
- Разность уровней при полной и малой воде – величина прилива.

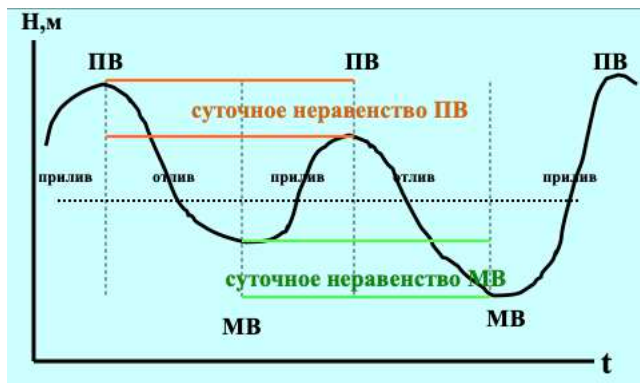


Рис. 19.3. Реальная схема суточных колебаний уровня воды у берега в период прилива.

Причины неравенства уровней воды в период Полной и Малой воды:

- Суточное изменение уровней ПВ и МВ, связанное с наклоном земной оси к плоскости эклиптики;
- Полумесячное изменение уровней ПВ и МВ, обусловленное вращением Луны и влиянием Солнца;
- Ежемесячное изменение уровней ПВ и МВ вследствие вращения Луны вокруг Земли по эллипсоидной орбите.

Типы смешанных приливов:

- Сизигия – увеличение отклонений уровня вследствие сложения приливообразующих сил (в новолуние и полнолуние);
- Квадратура – уменьшение отклонений уровня вследствие вычитания этих сил.

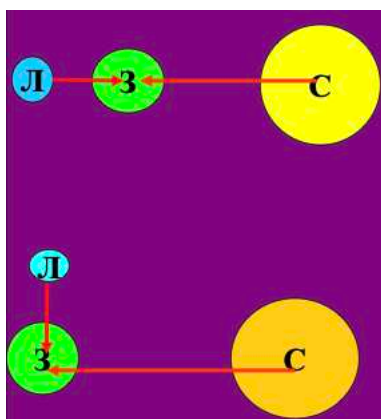


Рис. 19.4. Смешанные приливы.

Величина прилива в различных природных условиях:

Величина прилива, м	Регион
18	Северная Америка, залив Фанди
10-12	Патагония, Баффинова Земля, залив Аляска, Камбейский залив Индийского океана
13	Пенжинская губа Охотского моря
10	Мезенский залив Белого моря

Типизация приливов по характеру изменения уровня:

- Правильный полусуточный (рис. 19.5a);
- Смешанный: неправильный полусуточный (b) и неправильный суточный (c);
- Правильный суточный (d).

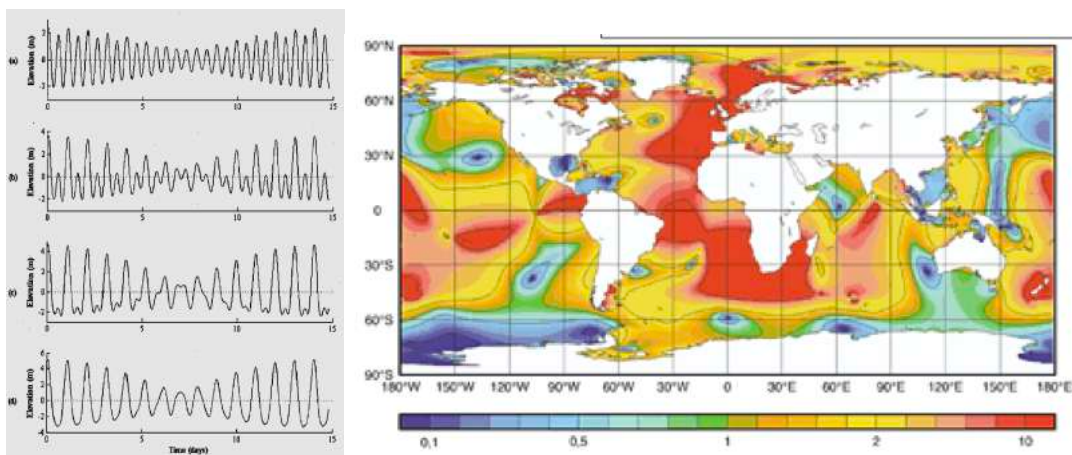


Рис. 19.5. Характер приливов: синий – правильный суточный, зеленый – неправильный суточный, желтый – неправильный полусуточный, красный – правильный полусуточный.

Внутренние волны: проявляются в колебаниях температуры и солености по глубине моря. Обусловлены трением в зоне контакта горизонтально смещающихся волн различной природы на границе слоев с разной плотностью.

- Высота: 10-100 м;
- Период волн: 0,12-4,0 часа;
- Длина λ : 0,1-200 км;
- Скорость распространения внутренней волны:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda(\rho_2 - \rho_1)}{2\pi(\rho_2 + \rho_1)}}, \quad (19.1)$$

где ρ_2 и ρ_1 – плотность воды в смежных условиях.

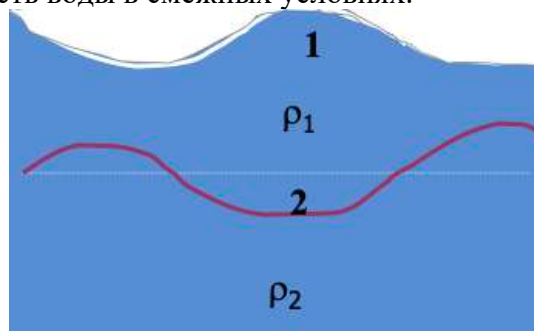


Рис. 19.6. Поверхностные (1) и внутренние (2) волны.

Морские течения и их классификация

Морское течение – поступательное движение масс воды в морях и океанах. Силы, влияющие на возникновение морских течений и их характеристики:

- Сила трения на границе раздела воздух-вода;
- Сила тяжести;
- Сила давления;
- Сила Кориолиса;
- Сила трения на границе вода-дно.

Классификация морских течений:

- Градиентные;
- Дрейфовые (фрикционные);
- Суммарные (дрейфово-градиентные).

Среди градиентных течений выделяют плотностные (термохалинные), ветровые (постоянные ветры вызывают перепады уровня) или стоковые. Большая часть постоянных течений в океане – градиентные, смешанной природы, но плотностная составляющая – главная, в том числе и в верхнем слое.

По времени существования выделяют постоянные, периодические и временные течения. По району расположения определяют поверхностные, глубоководные и прибрежные течения. Среди термических типов течений – теплые, холодные и нейтральные.

Геострофические течения – градиентные течения при наличии силы Кориолиса, возникают при наличии градиентов давления (за счет разной плотности или нагонов ветровых течений) при участии силы Кориолиса.

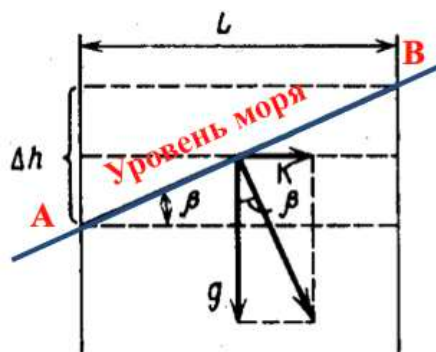


Рис. 19.7. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Для того чтобы понять, как возникают геострофические течения, рассмотрим рис. 19.7: течение потока в Северном полушарии идет «в чертеж». На жидкость действуют силы тяжести g и Кориолиса K ; поверхность наклонена так, что она перпендикулярна равнодействующей обеих сил. Тогда скорость потока:

$$v = \frac{g \operatorname{tg} \beta}{2\omega \sin \varphi} = \frac{g \Delta h}{2\omega L \sin \varphi} \quad (19.2)$$

Динамический метод вычисления течений в океане:
 Расчет высоты h в точке относительно нулевого (отсчетного) уровня по известному среднему удельному объему $\alpha = \frac{1}{\rho} (g - \text{ускорение свободного падения}, p - \text{давление})$:

$$h = \frac{10p\alpha}{g} \quad (19.3)$$

затем – вычисление скоростей по значениям Δh , построение карт.

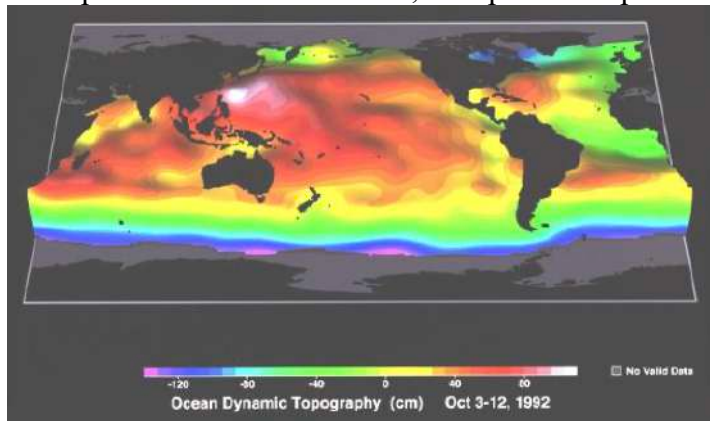


Рис. 19.8. Карта динамической топографии поверхности океана.

Теория дрейфовых течений: направление ветра (1) и направление поверхностной скорости движения морской воды (2) образуют угол 45° . Изменение скорости ветрового течения по глубине моря $V = f(h)$ описывается уравнением спирали Экмана (спиралевидная пунктирная линия на рис. 19.20).

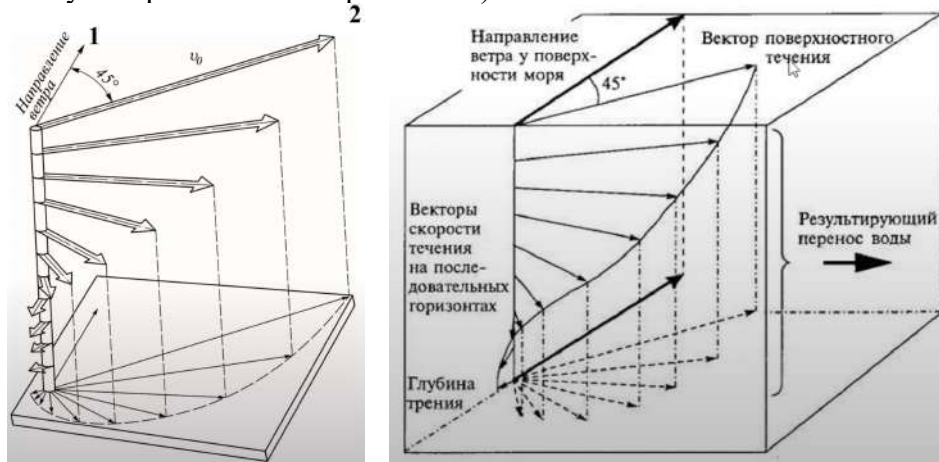


Рис. 19.9. Графическое изображение теории дрейфовых течений.

Связь скорости дрейфового течения и скорости ветра:

- На поверхности моря скорость течения зависит от скорости ветра W и географической широты φ :

$$V_{h=0} = \frac{AW}{\sqrt{\sin \varphi}} \quad (19.4)$$

- $A = 0,01 - 0,03$ – ветровой коэффициент;

- По глубине моря скорость ветрового течения уменьшается, а его направление отклоняется вправо в северном полушарии и влево – в южном полушарии под влиянием силы Кориолиса.

Особенности спирали Экмана: на некоторой глубине скорость ветрового течения противоположна по направлению поверхностной скорости, ее величина равна $0,04V_{h=0}$:

- Эта глубина называется глубиной трения;
- Глубина трения минимальна на полюсе и максимальная на экваторе;
- Обычно она не превышает 20-50 м.

Апвеллинг – следствие отклонения дрейфового течения.



Рис. 19.10. Графическое изображение апвеллинга.

Циркуляция вод в Мировом океане:

- Система круговоротов;
- Меридиональная циркуляция;
- Пограничные течения;
- Дивергенции и конвергенции;
- Межокеанская циркуляция – глобальный конвейер;
- Глубинная циркуляция.

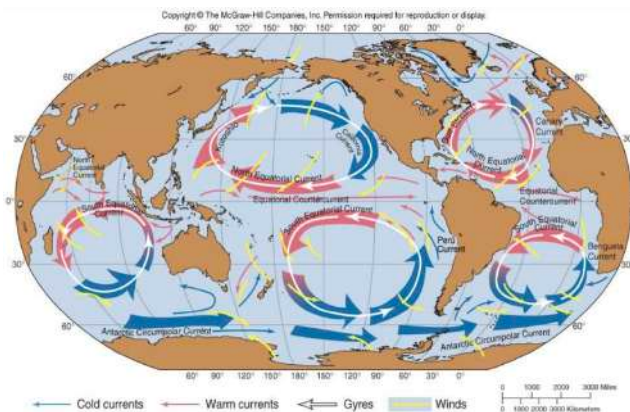


Рис. 19.11. Упрощенная схема основных течений на поверхности Мирового океана.

Самые плотные воды в открытой части Мирового океана формируются в двух источниках (рис. 19.12).

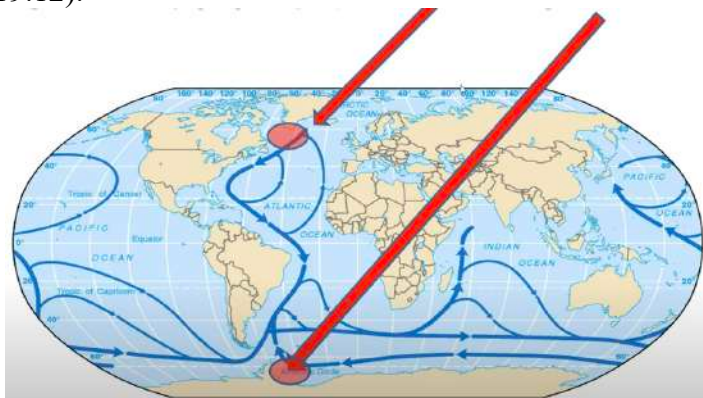


Рис. 19.12. Система западных пограничных течений.

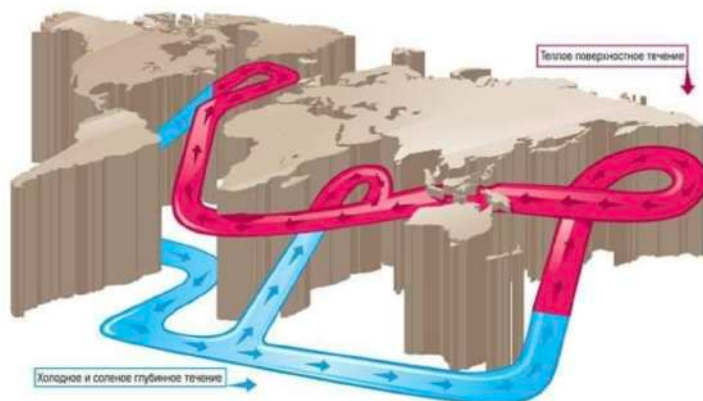


Рис. 19.13. Схема циркуляции вод Мирового океана – глобальный конвейер.

Разность уровня поверхности определяет поток теплых вод по его наклону из Тихого океана в Атлантику, составляя верхнюю ветвь «глобального океанского конвейера». Движущиеся на север в Атлантическом океане теплые воды компенсируют отток холодной глубинной водной массы, формируя дополнительный поток тепла в Северное полушарие, приводящий, в конечном счете, к смягчению климата Европы.

Водные массы океанов

Водная масса – сравнительно большой объем воды, формирующийся в определенном районе Мирового океана – очаге, обладающий комплексом физических, химических, биологических характеристик и распространяющийся как единое целое.

Параметры:

- Температура;
- Соленость;
- Плотность;
- Содержание кислорода;
- Биогенные вещества – кремний, азот, фосфор;
- Оптические характеристики (прозрачность);

- Радиоуглерод С-14, фреоны и др.

Структура водных масс:

- Поверхностные (до глубины ~ 300 м);
- Промежуточные (300 – 1500 м);
- Глубинные (1500 – 4000 м);
- Придонные (глубже 4000 м).

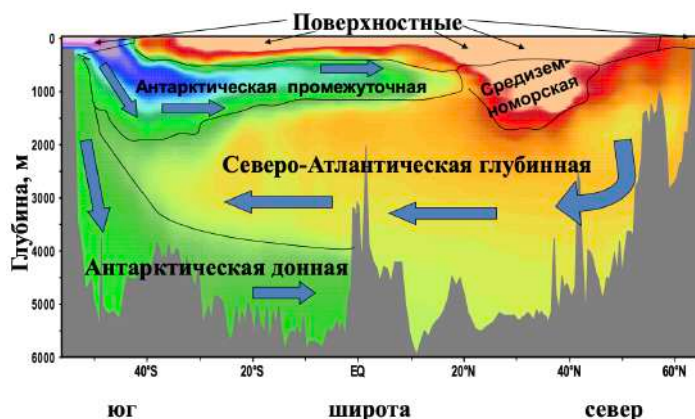


Рис. 19.14. Водные массы Атлантики в поле солёности.

Каждое измерение температуры и солёности на определенной глубине в поле, где по вертикальной оси – температура, а по горизонтальной – солёность, может образовать некую точку. Соединяя эти точки от поверхности до дна, мы получаем Т, S-кривые.

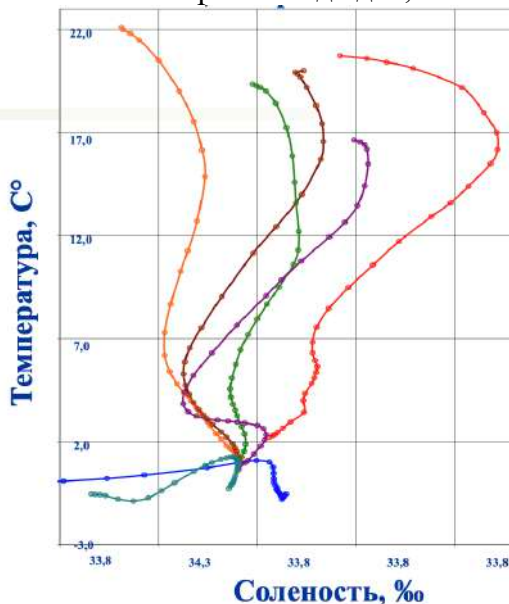


Рис. 19.15. Т, S-кривые океанов: Север Атлантики (красный), Север Тихого (оранжевый), Сев. Лед. Океан (синий), Индийский океан (зеленый), Южная Атлантика (фиолетовый), Южный Тихий (коричневый), Южный океан (бирюзовый).

Информацию об океане можно получить из прямых наблюдений, дистанционных наблюдений и численного моделирования. Последние два источника данных, как правило, нуждаются в результатах прямых измерений. Прямые измерения подразумевают специализированные научные суда, акустические профилографы скорости течений (ADCP), дрейфующие буи и буи нейтральной плавучести (измеряют температуру по траектории движения, соленость) и пр.



Рис. 19.16. Млекопитающее с измерителем.

Что измеряется со спутников:

- Высота поверхности (альтиметр);
- Течения (альтиметр);
- Батиметрия (альтиметр);
- Гравиметрия (альтиметр);
- Скорость ветра (скаттерометр);
- Направление ветра (скаттерометр);
- Волнение (скаттерометр);
- Температура поверхности
- Соленость на поверхности
- Хлорофилл.

Ресурсы Мирового океана, их использование и охрана

Мировой океан – это:

- 1.37 миллиардов км³ воды;
- 4.8*10¹⁶ т солей;
- 4,2 миллиарда км³ газов;

- 32.5 млрд. тонн морских животных с годовой продуктивностью 56 млрд. т;
- 1.7 млрд. тонн фитопланктона и водорослей с годовой продуктивностью 550 млрд. т.



Рис. 19.17. Ресурсы Мирового океана.

Газогидраты – твердое кристаллическое вещество, в одном объеме содержится до 180 объемов чистого природного газа. Для образования необходимы низкие температуры либо высокое давление. Встречаются в океанах на глубинах от 300 до 1200 м (98%), а на суше – в зоне вечной мерзлоты (2%). При повышении температуры воды и таянии мерзлоты возможно лавинообразное высвобождение метана из гидратов.

Глубоководные минеральные ресурсы: железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК), глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС).

В начале XXI в. добыча биологических ресурсов в Мировом океане характеризовалась двумя тенденциями: активным выходом за пределы 200-мильных экономических зон и вовлечением в добычу нетрадиционных объектов. Современная тенденция – вовлечение в морской промысел организмов низших трофических уровней. Это открывает доступ к биоресурсам, на порядки превосходящим традиционные.

Океан и современные изменения климата:

- 90% антропогенного прироста тепловой энергии депонируется в океане. Это приводит к возрастанию температуры океана на всех глубинах, повышению уровня океана за счет теплового расширения воды и таянию ледников, уменьшению площади морского льда, смещению ареалов промысловых видов.
- 30% антропогенного прироста двуокиси углерода попадает в океан – это приводит к подкислению океана, деградации и гибели кораллов, морских организмов.

Каждый год в океан попадает 13 млн. т. пластиковых отходов (80% всего мусора в океане). К 2025 году на каждые три кг рыбы в Мировом океане будет приходиться по одному кг мусора, к 2050 – соотношение составит 1:1.



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ