

Н. П. ЧЕБОТАРЕВ

УЧЕНИЕ О СТОКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1962

Николай Петрович Чеботарев

УЧЕНИЕ О СТОКЕ

Редакторы *Г. Н. Калинин* и *Е. В. Белякова*

Технический редактор *Г. И. Георгиева*

Сдано в набор 24/XI 1959 г.

Подписано к печати 22/III 1961 г. Л35192.

Формат $70 \times 108^{1/16}$, печ. л. 25,5.

Привед. печ. л. 35,7+0,85 л. вклеек.

Уч.-изд. л. 33,84. Изд. № 457.

Заказ тип. 1920. Тираж 4000 экз. Цена 2 р. 50 к.

1-я типография Трансжелдориздата МПС.

Москва, Б. Переяславская ул., д. 46

Н. П. ЧЕБОТАРЕВ

УЧЕНИЕ О СТОКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1962

*Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета*

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	Стр. 7
---------------------	------------------

Глава I

Введение

§ 1. Предмет курса	9
2. Значение стока в народном хозяйстве СССР	10
§ 3. Краткие исторические сведения	10
§ 4. Методы исследования стока	12
5. Особенности построения книги	13
§ 6. Общая характеристика стока и его факторов	13
§ 7. Водный баланс речных бассейнов	16

Глава II

Основные сведения, необходимые для исследования и расчета стока и его факторов

§ 1. Единицы измерения	20
§ 2. Площадь бассейна и речная сеть	20
§ 3. Географическая интерполяция и ее методы	22
4. Опорная гидрологическая сеть	23
§ 5. Применение методов математической статистики в гидрологии	24

Глава III

Осадки

§ 1. Распределение осадков по земной поверхности и во времени	46
§ 2. Снежный покров	49
§ 3. Ливневые осадки	53
§ 4. Годовые высоты осадков	60
§ 5. Определение средней высоты осадков по площади	65
§ 6. Влияние полей защитных полос на атмосферные осадки	66

Глава IV

Испарение и почвенная конденсация

§ 1. Физическая сущность испарения	68
§ 2. Три основных метода исследования естественного испарения	69
§ 3. Недостаток насыщения, его подсчет и распределение	71
§ 4. Испарение с поверхности воды, снега и льда	72
§ 5. Испарение с почвы	83
§ 6. Транспирация растений	89
§ 7. Испарение с поверхности речного бассейна (суммарное испарение)	92
§ 8. Почвенная конденсация	100

Глава V

Медленно изменяющиеся факторы

§ 1. Общие сведения	104
§ 2. Климат	104
§ 3. Размер, форма и рельеф бассейна	105
§ 4. Густота речной сети	107
§ 5. Почвенно-геологические условия	109
§ 6. Озерность и болотистость	110
§ 7. Растительный покров	120

Глава VI

Поверхностное накопление (аккумуляция), инфильтрация и подземный сток

§ 1. Поверхностное накопление (аккумуляция)	133
§ 2. Инфильтрация	140
§ 3. Подземный сток	153

Глава VII

Сток половодья

§ 1. Определение, характеристики и факторы	163
§ 2. Таяние снежного покрова	165
§ 3. Влияние метеорологических условий	181
§ 4. Формирование половодья	184
§ 5. Потери стока половодья	191
§ 6. Гидрограф половодья	197
§ 7. Максимальные расходы половодья	212

Глава VIII

Дождевой сток

§ 1. Общие сведения	232
§ 2. Формирование паводка	233
§ 3. Потери стока паводка	237
§ 4. Гидрограф паводка	239
§ 5. Максимальный расход паводка	246

Глава IX

Сток подземного питания

§ 1. Определение, значение и характеристика	263
§ 2. Теоретические исследования	263
§ 3. Зимний сток	271
§ 4. Летне-осенний сток	283
§ 5. Минимальный сток	290

Глава X

Годовой сток

§ 1. Факторы годового стока	302
§ 2. Годовой сток в зависимости от основных факторов первой группы	311
§ 3. Норма годового стока	314
§ 4. Колебание, изменчивость, асимметрия и обеспеченность годового стока	322

Глава XI

Внутригодовое распределение стока

§ 1. Общие сведения	339
§ 2. Гидрограф годового стока	339
§ 3. Сезонный сток	342

§ 4. Месячный сток	346
§ 5. Суточный сток	348
§ 6. Расчет внутригодового распределения стока с учетом водности года (по В. Г. Андреянову)	353

Глава XII

Твердый сток

§ 1. Введение	357
§ 2. Факторы твердого стока	361
§ 3. Формирование твердого стока	363
§ 4. Определение стока взвешенных наносов	367
§ 5. Сток влекомых по дну наносов	376
§ 6. Селевые потоки	378
§ 7. Химически растворенная часть твердого стока	381
Заключение	384
Литература	395

От автора

Настоящая книга является результатом многолетних исследований и чтения курса лекций по «стоку» студентам высших учебных заведений.

Кроме изложения общих вопросов, здесь содержатся результаты многих исследований автора, изложение некоторых дискуссионных вопросов и положений, которые возникли в процессе многолетней работы в области гидрологии. Книга может быть использована научными работниками, гидрологами, гидротехниками и мелиораторами при исследовании и расчете стока.

Считаю своим приятным долгом поблагодарить доктора технических наук проф. Е. В. Близняка, доктора технических наук проф. Б. А. Аполлова, доктора технических наук проф. А. Н. Бефани, кандидата технических наук доцента В. Д. Быкова, принимавших участие в рецензировании.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ПРЕДМЕТ КУРСА

Рост и развитие каждой области науки характеризуются ее разделением на отдельные самостоятельные части. Такая дифференциация коснулась геофизики и физической географии, из которых выделилась наука гидрология, распавшаяся затем на гидрологию моря и гидрологию суши. Последняя за советский период настолько разрослась, что некоторые ее части стали самостоятельными дисциплинами. Одной из таких частей и является учение о стоке. Основная причина интенсивного ее роста — развитие народного хозяйства СССР, и в частности использование водных ресурсов естественных водоемов (рек, озер, болот, подземных вод и др.). Водные ресурсы до революции использовались очень слабо — изучались только крупные реки, да и то только с точки зрения судоходства и мелиорации земель. После Великой Октябрьской социалистической революции водное хозяйство начало быстро развиваться. Естественные водоемы стали использовать комплексно, т. е. для многих отраслей народного хозяйства. В таком использовании естественных водоемов, и в частности рек, основную роль играла количественная сторона водных ресурсов, и прежде всего количество протекающей воды в естественном потоке. Поэтому учение о стоке получило наибольшее развитие среди других частей гидрологии суши.

Под учением о стоке мы будем понимать часть гидрологии, в которой рассматриваются формирование и методы определения стока, а также закономерности его распределения во времени и по территории в связи с окружающими физико-географическими условиями и деятельностью человека.

Еще недавно эта молодая отрасль науки носила чисто эмпирический характер. Теперь ряд частей учения о стоке получил теоретическое обоснование, но все еще сохраняется эмпиризм, не подкрепленный теорией, а также остаются вопросы, не разрешенные ни эмпирически, ни теоретически. Среди гидрологов все еще имеется тенденция при исследованиях гидрологических явлений, в частности стока, довольствоваться эмпирическими построениями без достаточного теоретического их обоснования. Такое положение влечет за собой появление иногда случайных связей или связей с ограниченными условиями их применения.

Являясь частью более общей дисциплины — гидрологии рек, данный курс в учебном плане не может предшествовать или идти параллельно с гидрологией рек. Последняя должна дать основные знания, касающиеся не только этой дисциплины в целом, но и некоторых элементов из области учения о стоке, с тем чтобы эти элементы служили как бы введением в последующий курс — учение о стоке.

С некоторыми из этих элементов студент начинает знакомиться еще ранее, когда он изучает гидрометрию.

§ 2. ЗНАЧЕНИЕ СТОКА В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ СССР

Директивами XXI съезда КПСС по семилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 гг. предусматривается дальнейшее развитие гидроэнергостроительства, орошения, осушения и других мелиоративных мероприятий.

Советский Союз обладает наибольшими водными ресурсами в мире.

Крупнейший гидротехник В. М. Лохтин [201] в 1904 г. писал: «Нет ни одной страны в мире, где бы реки и судоходство имели такое значение, как у нас. По ним разветвлялась во все стороны наша народность, наши торговые и промышленные центры».

Общая протяженность водных путей достигает 500 тыс. км, они обладают большими запасами водной энергии, их потенциальная установленная мощность составляет около 300 млн. кВт. Наши реки располагают большими водными ресурсами для орошения земель. Орошение необходимо не только для пустынных засушливых местностей (например, Среднеазиатская часть СССР, где без орошения невозможно ведение сельского хозяйства), но и в других районах недостаточного увлажнения.

В 1958 г. закончено строительство волжской гидроэлектрической станции им. В. И. Ленина, которая обладает мощностью в 2,3 млн. кВт. Закончилось также строительство Волгоградской гидроэлектростанции на Волге, которая будет давать около десяти миллиардов киловатт-часов электроэнергии в средний по водности год.

Изучение стока необходимо для рациональной организации производства гидроэнергии, орошения, водоснабжения, судоходства и т. д.

§ 3. КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Учение о стоке развилось в самостоятельный предмет в начале тридцатых годов этого столетия в связи с интенсивным ростом промышленности в первую пятилетку. Однако первые исследования водных ресурсов относятся к семидесятым годам прошлого столетия, когда была создана навигационно-описная комиссия, которая в 1875 г. приступила к организации сети водомерных постов на судоходных реках и озерах. С этих пор началось систематическое и стационарное изучение водного режима естественных водоемов.

В 1883 г. была опубликована одна из первых формул ливневого стока А. Н. Пушечникова, а в 1889 г. появилась работа А. О. Карачевского-Волка.

В 1897 г. Ф. Зброжек сделал первую попытку анализа стока дождевых вод.

В 1903 г. появляется труд Е. А. Гейнца «Водоносность бассейна верховья Оки в связи с осадками». В этой работе впервые применяется уравнение водного баланса и указывается на независимость нормы стока от площади бассейна. В 1904 и 1914 гг. вышел труд Е. В. Оппокова «Режим речного стока в бассейне Верхнего Днепра», который содержал результаты исследования режима стока Днепра выше Киева. Здесь также применяется уравнение водного баланса и проводится анализ колебания стока и осадков.

В Средней Азии в начале XX в. в связи с развитием хлопководства и орошения появился ряд работ по гидрологии рек. Из них следует упомянуть работу Э. М. Ольдекопа «Об испарении с поверхности речных бассейнов» (1911), в которой впервые дано достаточно полное и вполне научное представление по этому вопросу. Начиная с 1906 г. в течение 20 лет Н. Е. Долгов производил наблюдения над ливневыми осадками и расходами. Результаты

их он изложил в трех томах, изданных с 1908 по 1915 г., где даются нормы расчетных максимальных расходов воды.

В 1907 г. Ю. В. Ланге предложил формулу для максимальных расходов, а затем над этим вопросом работали Р. П. Спарро, Г. Тарловский и позже, в 1911 г., Л. Ф. Николай.

Наиболее интенсивно гидрология, и в особенности учение о стоке, начинает развиваться после Октябрьской революции. Это вызывалось прежде всего жизненными потребностями страны. В 1919 г. создается Государственный гидрологический институт. В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина организуется Государственная комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО), которая в 1921 г. разработала план электрификации. Известно, что через 15 лет (к 1936 г.) план был перевыполнен в 3,7 раза. Для осуществления плана электрификации и развития промышленности нужно было знать водные ресурсы страны, а следовательно, развивать гидрологию.

В связи с тем что наблюдения над метеорологическими и гидрологическими элементами у нас в стране производились по разной методике, что вело к неоднородности архивного материала и разбросанности его по многим учреждениям, в 1929 г. был организован Гидрометеорологический комитет при СНК СССР. В настоящее время гидрометеорологические исследования ведутся под руководством Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Исследования водных объектов и метеорологических элементов в основном стали производиться по единому плану и общей методике.

В 1931 г. Госпланом СССР было принято постановление о составлении Водного кадастра СССР, т. е. свода обработанных и систематических сведений об естественных водоемах страны и их использовании.

Были созданы два учебных гидрометеорологических института, позже Центральный институт прогнозов, ряд гидрологических обсерваторий, стоковых станций и других гидрометеорологических учреждений. Наряду с этим сильно выросла сеть гидрометеорологических наблюдательных станций и постов.

В гидрологии в течение некоторого времени развивались эмпирические методы, позволявшие, хотя и очень приближенно, отвечать на ряд требований практики.

На протяжении 1923—1930 гг. появились замечательные по тому времени работы А. А. Труфанова («Речная гидрология», 1923), Д. И. Кочерина и М. А. Великанова, которые послужили основой учения о стоке. Необходимо отметить работы Д. И. Кочерина по нормам годового стока и его вариации, о максимальных расходах талых и дождевых вод, испарении и коэффициентах годового стока.

Учебник по гидрологии суши М. А. Великанова явился первым руководством для гидрологов и инженеров, соприкасавшихся с гидрологией.

Эмпирические построения, даже самые простые, оценивались тогда специалистами как значительные достижения, они быстро внедрялись в практику, часто без достаточных предварительных проверок и анализа.

После 1930 г. в исследовании стока получили широкое применение методы математической статистики.

Увлечение статистическим методом было настолько сильно, что научная мысль в значительной мере направлялась на разработку теоретических основ статистического метода (например, создавались новые формулы кривых распределения с теоретическим и эмпирическим обоснованиями) в ущерб генетической гидрологии, которой не всегда уделялось достаточно внимания.

Большую роль в развитии гидрологии все же сыграли генетический подход к построению эмпирических формул и обобщение теоретических

исследований. Здесь нельзя не отметить работы М. А. Великанова и некоторых других исследователей.

Период конца 50-х годов отличается некоторым охлаждением к широкому применению методов математической статистики и перенесением центра научной мысли на генезис явления, на обобщения и теоретические исследования. Однако еще многие гидрологи прибегают к простым эмпирическим построениям без достаточного теоретического их обоснования. Этот период характеризуется также стремлением учитывать влияние производственной деятельности человека на гидрологические процессы.

В настоящее время мы с гордостью можем заявить, что советская гидрология является подлинно научной, в то время как зарубежные страны, в том числе и США, в гидрологических вопросах находятся еще в значительной доли в стадии эмпиризма. Д. И. Кочерин и М. А. Великанов, а также А. Н. Костяков, Б. В. Поляков, Б. А. Аполлов, А. В. Огиевский, Б. Д. Зайков, Д. А. Соколовский, Е. В. Близняк, М. Ф. Срибный, Н. Д. Антонов, А. Д. Дубах, Г. П. Калинин, В. Д. Комаров, А. Н. Бефани, Б. И. Куделин, М. М. Протодионов и другие ученые Советского Союза создали гидрологию и в особенности учение о стоке. Можно определенно утверждать, что учение о стоке является детищем СССР.

§ 4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОКА

Основным методом познания для всех наук является марксистский диалектический метод. Исходя из его положений, мы стремились на основе существующих теорий произвести физический анализ гидрологических явлений, который позволил бы глубже проникнуть во внутреннюю структуру и установить их закономерности. Теоретические основы, эксперимент и наблюдения в естественных условиях — вот тот исходный материал, который должен быть положен в основу исследования.

Здесь применяются два основных физических закона: закон сохранения вещества (метод водного баланса) и закон сохранения энергии (метод теплового баланса).

Сток — один из элементов водного баланса, поэтому этот метод будет применен и для исследования всех видов стока.

Там, где приходится сталкиваться с тепловыми явлениями (испарение, конденсация, таяние, замерзание), используется метод теплового баланса.

Пути исследования делятся на экспедиционные, стационарные, экспериментальные и теоретические.

Экспедиционный путь исследования представляет собой проведение кратковременных наблюдений, основной задачей которых является сбор материалов. Он отличается быстрым охватом большого числа объектов.

Стационарный путь заключается в проведении систематических или непрерывных наблюдений (по определенным программам) над одним или, чаще всего, комплексом явлений при помощи специального оборудования и приборов.

Экспериментальные исследования обычно производят в лабораториях или на стоковых станциях, где представляется возможность рассмотреть влияние того или иного фактора (например, исследование времени добега воды в лотках при различных уклонах или расходах и т. д.).

Теоретические исследования проводятся, как правило, до и после обработки результатов наблюдений и экспериментов. Так, до организации наблюдений над интенсивностью снеготаяния подвергались анализу возможности применения метода теплового баланса для расчетов. На основе проведенных наблюдений и теоретических исследований уточнялись параметры и структура формул.

В области исследования стока за последние двадцать лет широко распространился статистический путь исследования. Увлечение им приводило иногда к чрезмерному развитию статистических приемов, что тормозило развитие вопросов стока. Отдавая должное статистическому пути исследования, нужно прежде всего исходить из сущности явления, производить генетический анализ в каждом отдельном случае. Изучив явление с физической стороны, установив естественные закономерные связи с причинами, вызывающими его, исследователь далее может прибегать и к методам математической статистики.

Статистический путь исследования должен быть тесно связан с генетическим методом. Оторванное от генезиса явления статистическое исследование влечет за собой формальное толкование его и может привести к искаженным результатам, отклоняющимся от реальной объективности.

§ 5. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КНИГИ

Мы стремились осветить основные достижения в области изучения стока, не ограничиваясь только конечными результатами произведенных исследований или изложением только вполне разрешенных вопросов. Рассматриваются и проблемные вопросы, их анализ и возможные пути разрешения.

Кроме того, мы не избегали постановки и новых, дискуссионных вопросов, на которые, быть может, не существует даже гипотетических ответов. Наряду с изложением общих положений учения о стоке содержится ряд предложений и схем автора, которые находятся в стадии своего развития.

Чтобы данная монография могла быть полезной и для инженеров в их практической деятельности, помещены расчетные формулы, таблицы, графики, картограммы, а также примеры применения некоторых методов.

§ 6. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТОКА И ЕГО ФАКТОРОВ

Определение и классификация стока

Количество воды, стекающее с данного бассейна за определенный отрезок времени, называется стоком.

В состав стока входят воды атмосферного происхождения с незначительной долей ювенильных вод; иногда в стоке могут участвовать воды, вызванные деятельностью человека, например сбросные оросительные или технические воды и др.

Сток осуществляется поверхностными и подземными путями. Кроме того, каждый из этих двух основных видов делится на части по роду питания. Общая схема деления стока представлена на рис. I,1.

Сток называется поверхностным, если он образуется атмосферными осадками, стекающими по поверхности суши, и подземным, если он возникает вследствие инфильтрации и конденсации воды в почве.

В чистом виде поверхностный или подземный сток встречается редко. Если значительно превалирует первый, то это будет сток поверхностного питания, если второй — подземного питания.

Отличительными свойствами стока поверхностного питания являются: 1) интенсивное и сравнительно большое поступление воды для питания речной системы; 2) малая естественная зарегулированность (за исключением рек только с ледниковым питанием); 3) резко выраженное неустановившееся движение.

Процессом, образующим поверхностный сток, является стекание, или движение вод по поверхности бассейна. Под действием силы тяжести прои-

ходит стекание воды по поверхности от высоких к низким точкам бассейна, т. е. от водоразделов к тальвегам и далее по тальвегам в более или менее постоянные русла речной системы, сначала в мелкие, а затем в более крупные. Такое стекание заканчивается поступлением собранных с бассейна вод в озеро, море или океан.

Стекание воды по поверхности бассейна происходит в соответствии с характером рельефа бассейна. Обычно на реках ближе к водоразделам уклоны, а следовательно и скорости стекания, больше; наоборот, ближе к устьям рек уклоны и скорости течения меньше.

Сток определяется количеством воды, стекающей через данный створ за тот или иной отрезок времени.

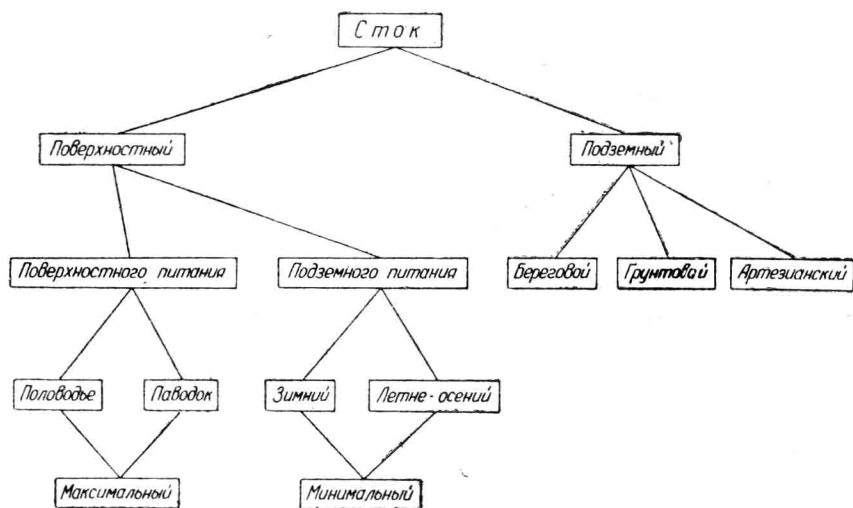


Рис. 1, 1. Общая схема деления стока

Так как сток в значительной степени зависит от условий стекания, то необходимо изучать гидродинамические условия движения воды по поверхности бассейна.

Поверхность склона, на который выпадают атмосферные осадки в жидком виде или где происходит таяние снежного покрова, обычно представляется испещренной мелкими извилистыми бороздками. Эти бороздки создаются бугорками земли, корневыми остатками растительности, углублениями, вызванными естественными и искусственными причинами. Стеkanie воды по такой поверхности происходит мелкими ручейками с небольшой эрозионной и транспортирующей способностями.

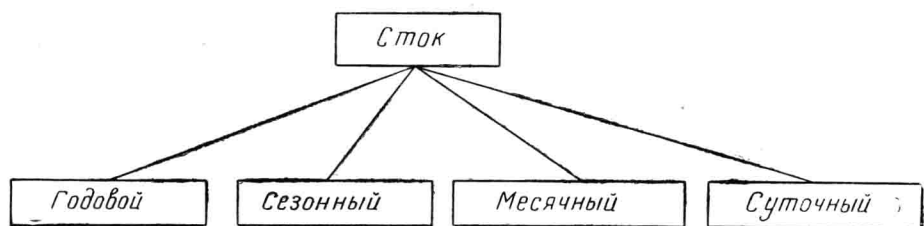
В местах с большими уклонами, на легко размываемых почво-грунтах, иногда наблюдаются небольшие бороздки или даже рывины.

Склоны, вспаханные бороздами, параллельными горизонталям, частично задерживают стекающие воды, и поверхностный сток здесь снижается.

Под поверхностным стоком подземного питания понимают сток, образующийся главным образом подземными водами, выходящими на дневную поверхность в пределах данного бассейна. Не следует забывать, что подземный сток при выходе на дневную поверхность суши становится уже частью поверхностного стока.

Подземный сток делится на береговой, или аллювиальный, грунтовой и артезианский. Береговой, или аллювиальный, — такой подземный сток,

который образуется за счет запасов воды, накопленных в ближайшей зоне к берегам потока. Подземный грунтовой сток образуется верхними (сезонными) грунтовыми водами типа верховодки, а также за счет основных горизонтов грунтовых вод, дренируемых речной долиной, и вод нисходящих источников постоянного действия. Под подземным артезианским стоком понимается такой подземный сток, который поступает в реки из артезианских водоносных горизонтов, обладающих напором, и из восходящих источников. Основное отличие поверхностного стока подземного питания от подземного стока заключается в том, что подземный сток является подземным до тех пор, пока движение воды происходит под дневной поверхностью, а поверхностный сток подземного питания получает свое название с момента выхода подземных вод на дневную поверхность.



В зимний и летне-осенний периоды реки питаются главным образом подземными водами, поэтому поверхностный сток подземного питания делится на зимний и летне-осенний. Это различие не только сезонное. Наконец, в классификации деления стока по роду питания необходимо указать на половодье и паводок, а также на образование максимального и минимального стоков. Максимальный сток образуется от поверхностного стока (половодье и паводок), наиболее мощный; минимальный сток — от подземного, который значительно слабее.

Такова наша классификация стока по роду питания.

Помимо генетической схемы деления стока (по роду питания), необходимо рассматривать также и календарную схему.

Существенным здесь является граница отрезка времени для каждого вида стока. Для всех видов отрезок времени точно определяется календарными сроками, однако для сезонного периода такой точной фиксации может и не существовать. За сезонный период весны часто принимают, например, март — апрель тогда как календарный период — март — май. Лето иногда делят на две части: первое лето — июнь — июль, второе — август — сентябрь. Кроме этих отрезков времени, могут встречаться также десятидневный сток и пятидневный, а также пятилетний, десятилетний стоки и т. д. В каждом из указанных видов стока можно рассматривать средний, максимальный и минимальный (или сток определенной обеспеченности).

Общая характеристика факторов

Факторы стока — это те причины, которые прямо или косвенно влияют на формирование речного стока. Например, осадки представляют фактор с прямым влиянием на образование стока, а дефицит влажности — с косвенным. Факторов стока очень много, но мы будем рассматривать наиболее эффективные.

Все факторы можно разделить на естественные и искусственные.