

А.М. Владимиров

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СТОКА В МАЛОВОДНЫЙ СЕЗОН

A.M. Vladimirov

FACTORS OF FORMATION OF EXTREMELY LOW RIVER RUN-OFF DURING A DROUGHT

Систематизированы физико-географические и антропогенные факторы, влияющие на прекращение речного стока и возникновение гидрологических засух, определена их взаимосвязь. Вскрыта физическая картина формирования стока в речной сети в засушливый период. Предложены способы определения основных характеристик периодов отсутствия стока.

The physiographic and antropogenous factors affecting discontinuance of river run-off and emergence of hydrological droughts are studied and systematized. Interaction of these factors is determined. The physical pattern of river run-off formation during droughts is revealed. Methods of definition of the basic characteristics of the drought periods are proposed.

Проблема пресной воды постоянно возрастает в масштабах не только России, но и Земли в целом. Общее потребление воды в ближайшие 20 лет возрастет на 40 % (по данным ВМО), а две трети населения Земли будут испытывать в разной степени нехватку воды. В связи с этим строятся каналы для переброски стока на сотни километров (Китай, Египет и др.).

Исследования Межправительственной группы экспертов ВМО по изменению климата отмечают, что в связи с происходящим потеплением будет происходить увеличение частоты и продолжительности засух.

Изучение физических условий возникновения периодов прекращения стока в реках необходимо начинать с исследования предпосылок к прекращению речного стока, тех факторов, которые обуславливают пересыхание или замерзание рек.

Прекращение стока воды в руслах рек может происходить в летний или зимний сезоны в результате воздействия ряда природных (естественных) факторов. К ним относятся, прежде всего, такой климатический фактор как температура воздуха и фактор подстилающей поверхности – запасы воды в бассейне реки.

Соотношение этих запасов и потерь воды на испарение (в результате воздействия высоких температур воздуха и почвы) летом или на образование льда (в результате промерзания рек и почво-грунтов) зимой определяют степень уменьшения речного стока, вплоть до его прекращения.

Наряду с указанными решающими факторами, имеются и второстепенные, которые в локальных условиях могут иметь весьма большое значение. На рис. 1

показана структурная схема физико-географических факторов, влияющих на возникновение и формирование периода с отсутствием стока воды в русле реки в летний сезон.

Предпосылкой прекращения стока является длительное отсутствие дождей и стояние высоких и очень высоких температур воздуха. Одновременно с этим существенно понижается влажность воздуха. В результате возникает атмосферная засуха. Синоптический процесс в этом случае связан с наличием стационарного антициклона с высоким давлением воздуха, распространяющимся на обширные территории, при полном отсутствии осадков. Так, в 1972 г. наблюдалась засуха, охватившая площадь более 3 млн км² в Южной, Центральной и даже Северо-Западной Европейской части России.



Рис. 1. Структурная схема физико-географических факторов, определяющих возникновение пересыхания рек

Продолжительность атмосферной засухи составила около двух месяцев (июль–август). При этом высокие температуры воздуха наблюдались уже с июня, а осадков в предшествующие месяцы выпало много меньше нормы [Владимиров А. М., 1974].

Длительное стояние высоких температур воздуха и большая солнечная радиация обуславливают повышение температуры почвы и уменьшение разницы между дневной и ночной температурами.

Происходит иссушение почвенного слоя водосбора. Одновременно усиливается транспирация влаги растительностью. Происходит снижение уровня горизонта подземных вод, известное как падение уровня воды в колодцах в засушливый сезон, высыхание болот.

Температурная группа факторов определяет потери на испарение с водосбора реки. Они становятся наибольшими в засушливый период и, являясь отрицательным фактором в водном балансе бассейна реки, существенно влияют на интенсивность уменьшения речного стока во времени.

Большую роль при этом играет предшествующее засухе увлажнение почвогрунтов. При слабом предшествующем увлажнении (выпадение осадков меньше нормы, невысокое половодье) процесс иссушения начинается раньше.

Таким образом, климатические факторы создают первичные условия возникновения гидрологической засухи, т.е. уменьшения расходов воды в водотоках вплоть до прекращения речного стока и пересыхания (или высыхания) реки.

Помимо вышесказанного, интенсивность уменьшения стока в русле реки вплоть до его прекращения зависит от запасов подземных вод в речном бассейне. Чем меньше в бассейне имеется водоносных горизонтов, питающих реку, и чем они беднее водой, тем быстрее произойдет их истощение, что, в свою очередь, приведет к прекращению стока в русле реки. Количество водоносных горизонтов обычно связано с глубиной эрозионного вреза русла. Чем она меньше (при прочих равных условиях, особенно для равнинных территорий), тем больше вероятность прекращения речного стока. В этом случае сток начинает пропадать обычно в верховьях рек и их водосборов. Это характерно для рек равнинных территорий лесной зоны.

Существенную роль в формировании минимального стока рек и образовании периода с отсутствием стока играет тип питания и вид взаимосвязи речных и подземных вод (характеризуемой типом гидравлической связи). В период минимального стока реки могут питаться верховодкой, грунтовыми безнапорными водами, напорными грунтовыми (артезианскими) водами, карстовыми водами. К началу пересыхания верховодка полностью срабатывается. Также быстро срабатываются карстовые воды, если они находятся в карстовых породах с быстрой водоотдачей. Карст с медленной водоотдачей и напорные грунтовые воды обычно обеспечивают длительное питание рек. Поэтому период отсутствия стока на таких реках, как правило, не наступает.

При отсутствии гидравлической связи речных и подземных вод режим речного стока зависит от режима питающих реку родников. В случае, если водоносный пласт имеет небольшую мощность или не связан с артезианскими водами, поступление воды в русло может прекратиться и произойдет пересыхание реки. Обычно это происходит в верховьях рек.

При постоянной гидравлической связи речных и подземных вод в период минимального стока их режим совпадает. Поэтому при истощении питающего реку водоносного горизонта (или горизонтов) на реке наступает период отсут-

ствия стока. В этом случае водоносный горизонт (или горизонты) располагается приблизительно горизонтально или наклонно к руслу реки с обеих сторон.

При одностороннем наклонном положении водоносных пластов по отношению к руслу реки происходит приток воды с одной стороны и отток воды от русла с другой. В зависимости от баланса прихода и расхода воды может наступить пересыхание русла, если расход воды, поступающей сверху по руслу и сбoku из подземного горизонта, будет недостаточным, чтобы сохранить сток в русле.

В зоне недостаточного увлажнения глубина залегания подземных вод, питающих реки в период минимального стока, значительно увеличивается, а истощение подземных вод верхних водоносных горизонтов происходит довольно быстро. Поэтому малые реки могут пересыхать уже в начале лета и на длительный срок.

Особый тип взаимосвязи речных и подземных вод наблюдается в тех районах, где русло реки располагается выше безнапорного водоносного горизонта. В этом случае происходит фильтрация русловых вод в водоносный пласт, поскольку русло оказывается как бы в подвешенном состоянии по отношению к водоносному пласту, расположенному ниже вреза русла. Естественно, что в этом случае происходят потери воды из русла и чем они значительнее, тем быстрее произойдет уменьшение речного стока вплоть до высыхания русла.

Рассмотренные типы питания рек и характера взаимосвязи речных и подземных вод в природных условиях могут встречаться в сложном сочетании даже в масштабах одной реки или речного бассейна.

В период пересыхания на реке может отсутствовать видимый сток воды, но сохраняться подрусловой сток. Это происходит при наличии достаточно обширных плесов, прерываемых осушенными перекатами. В этом случае перетекание воды происходит подземным путем в русловых отложениях, особенно, если они сложены рыхлыми породами (песок, галька). Благоприятствует этому наличие низких пойм с песчано-галечным составом наносов, имеющих большую мощность. Такие реки обычно протекают в предгорных районах. Наиболее ярко наличие подруслового стока бывает выражено в конусах выноса горных рек.

Помимо вышеуказанных факторов, в отдельных случаях могут проявляться особые факторы, вызывающие прекращение речного стока. В результате землетрясения может произойти сдвиг водоносного пласта, следствием чего будет прекращение действия родников или уход воды из колодцев и прекращение стока в реке.

К прекращению стока приведет и естественный завал (оползень) русла реки. В этом случае сток может возобновиться после размыва завала, а о пересыхании реки можно говорить лишь условно.

В карстовых районах могут быть участки русла, на которых происходит уход воды под русло на разные расстояния с последующим возвратом. В этом случае целесообразно говорить не о пересыхании реки, а о временном исчезновении стока.

Таким образом, такие факторы как подрусловой сток, карст, сдвиг пластов, завал русла могут отсутствовать вообще или иметь узко локальное значение.

В зимний сезон, как и в летний, предпосылкой перехода периода минимального стока в период отсутствия стока, то есть в состояние перемерзания (промерзания) рек, на первом месте находится температура воздуха. На рис. 2 представлена структурная схема физико-географических факторов, определяющих возникновение перемерзания (промерзания) рек.



Рис. 2. Структурная схема физико-географических факторов, определяющих возникновение перемерзания (промерзания) рек

Чрезвычайно низкая температура воздуха ведет к глубокому промерзанию почво-грунтов на водосборе и формированию мощного льда на реках, водоемах и болотах, обуславливая прекращение речного стока и промерзание водоемов. При этом имеет значение не только величина снижения температуры воздуха, но и длительность стояния низких температур. Чем больше сумма отрицательных температур за зимний сезон, тем суровее зима. Длительное стояние низких температур воздуха обуславливает большую глубину промерзания почво-грунтов и максимальную толщину льда на водных объектах.

Экстремальные температурные условия усугубляются в случае малоснежной зимы, поскольку утепляющая роль снега резко снижается при невысокой толщине снежного покрова на водосборе.

Глубина промерзания почво-грунтов в лесной зоне в экстремальные зимы может достигать более метра. В результате происходит отчленение водоносных горизонтов от русла и прекращается сток воды, пока не начнется оттаивание мерзлого слоя.

В зоне многолетней мерзлоты (60 % территории России) в зимний сезон происходит смыкание замерзшего верхнего активного слоя почво-грунтов с многолетнемерзлыми породами. Питание рек происходит лишь из глубоких водоносных горизонтов, в основном, трещинного характера и таликов под руслами средних и больших рек. В связи с этим площадь рек с ежегодным промерзанием увеличивается в среднем до 5000 км², а с эпизодическим – до 200–230 тыс. км². При этом может сохраняться подрусовой сток.

В суровые зимы на водных объектах образуется лед наибольшей толщины. В результате воздействия низкой температуры воздуха быстрый рост льда может привести к формированию ледовой перемычки. При этом может усиливаться подрусовой сток или возникнуть наледь. В случае же сильного уменьшения стока вплоть до его прекращения происходит промерзание реки, когда в русле остается лишь лед.

Анализ соотношения толщины льда и глубины реки в конкретном створе позволяет оценить возможность перемерзания реки. Для этого можно использовать график связи нарастания толщины льда с увеличением суммы отрицательных температур воздуха.

В суровые зимы интенсивно срабатываются запасы подземных вод, поскольку отсутствуют какие-либо пополнения водоносных горизонтов. В связи с этим имеет большое значение осеннее пополнение запасов подземных вод. Поэтому, чем меньше осенних осадков, чем суше осень, тем быстрее происходит истощение их запасов и быстрее наступает прекращение стока даже при относительно небольшой толщине льда.

На эпизодически перемерзающих реках может сохраняться подрусовой сток в наиболее мелких местах русла. Наличие этого стока позволяет сохранять необходимые гидроэкологические условия в плесовых участках рек, не допуская заморов рыбы.

Возникновение и продолжительность перемерзания реки в известной мере зависит от типа гидравлической связи подземных и речных вод. При отсутствии гидравлической связи (нисходящий тип питания) прекращение стока в реке наступает при прекращении подземного притока из питающего реку горизонта, который может полностью промерзнуть или перемерзнуть выход родников.

При наличии гидравлической связи подземных вод с рекой режим стока реки определяется режимом подземных вод. Прекращение стока в реке происходит после истощения подземных вод в последнем водоносном горизонте, питающем реку, или при его промерзании. Последнее обычно происходит в зоне многолетней мерзлоты, когда смыкаются сезонно промерзающие горизонты с многолетне промерзающими. Остальные факторы (глубина вреза русла, нали-

чие карста, сдвиг водоносных пластов, естественный завал русла) имеют то же значение для перемерзания рек, что и для пересыхания.

В период межени речной сток может находиться под воздействием ряда факторов, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности человека, которые могут привести к прекращению стока воды в русле.

Наличие водохранилищ (прудов) сезонного регулирования, используемых для орошения, может привести к пересыханию реки ниже водохранилища. В зависимости от емкости водохранилища и засушливости сезона продолжительность отсутствия стока может быть от небольшой до длительной. Эти же водохранилища могут использоваться для других сельскохозяйственных нужд, особенно в наиболее засушливый период.

Помимо удовлетворения сельскохозяйственных нужд, строятся водохранилища для промышленных целей. При этом требования к водоснабжению могут быть весьма серьезными, не допускающими перерыва водоснабжения. Следовательно, в маловодный период ниже плотины сток может прекращаться полностью.

При мелиоративных работах производятся заборы воды из рек для орошения вплоть до полного разбора реки в особо засушливые годы, особенно в зоне недостаточного увлажнения.

При осушении переувлажненных территорий производятся работы по сбросу излишней воды, что способствует пересыханию реки на отдельных участках в меженный период, поскольку осушенные территории исключаются из участков питания реки в засушливые периоды.

При строительстве больших карьеров или при наличии уже существующих (район Курской магнитной аномалии, алмазодобывающие карьеры и подобные) в зоне влияния карьера происходят потери речных и подземных вод в результате откачек, когда река оказывается на отдельных участках в подвешенном состоянии.

Подобное наблюдается и в районах интенсивной эксплуатации подземных вод для хозяйственных нужд (Московский артезианский бассейн и др. районы).

Основными расчетными характеристиками при исследовании периодов отсутствия стока являются факторы, присущие пересыханию и перемерзанию или только пересыханию, или только перемерзанию. Исследования производятся применительно к малым и средним рекам.

Температура воздуха может быть выражена средней по водосбору суммой суточных температур воздуха за период от начала сезона до начала периода пересыхания или перемерзания.

Вторым по значению являются сведения о запасах подземных вод в речном бассейне, которые можно характеризовать уровнем подземных вод к началу пересыхания или перемерзания реки.

Непосредственно с запасами подземных вод связано увлажнение почвогрунтов бассейна, оцениваемое их влажностью к началу пересыхания или перемерзания реки. На эпизодически пересыхающих или перемерзающих реках не-

редко встречаются подрусловые воды. Их наличие можно установить с помощью шурфа или скважины.

В летний сезон, когда происходит пересыхание рек, потери на испарение с водосбора являются наибольшими и рассчитываются принятыми в гидрологии методами.

Температура почвы в летний сезон может быть оценена как средняя по водосбору сумма суточных температур от начала жаркого периода до начала пересыхания.

В зимний сезон глубина промерзания почво-грунтов может быть принята как максимальная к началу перемерзания реки.

Толщина льда на реке принимается максимальной к началу перемерзания в расчетном створе или на участке промерзания русла.

Глубину эрозионного вреза русла равнинных рек можно определить по уравнению:

$$h_{\text{ВР}} = h_{\text{СР.ВДР}} - h_{\text{Т.Р.}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{ВР}}$ – глубина вреза русла; $h_{\text{СР.ВДР}}$ – средняя отметка водораздела; $h_{\text{Т.Р.}}$ – отметка тальвега русла в створе наблюдений.

Временными характеристиками периода отсутствия стока служат: начало пересыхания или перемерзания реки, их окончание и продолжительность. При этом продолжительность отсутствия стока может быть короткой или длительной. Если пересыхание или перемерзание длится не более 7 суток, то оно считается коротким, если более 7 суток – длительным. Если период отсутствия стока прерывается появлением воды в русле на некоторое время, то он считается прерывистым и в этом случае его длительность будет меньше, чем разность между началом и окончанием всего периода отсутствия стока. Если же период не прерывается, то он считается устойчивым и, как правило, является продолжительным.

Для постоянного водотока, не имеющего перерывов в стоке воды в меженный период, в речном бассейне всегда можно выделить площадь начального стока и площадь с наличием какого-либо русла с текущей водой. Площадь начального стока существует в верховьях рек в форме водоносного горизонта, выклинивающегося в понижении в виде родника (или родников) или пластовых вод и дающих начало речному руслу. Подобная схема показана на рис. 3, а.

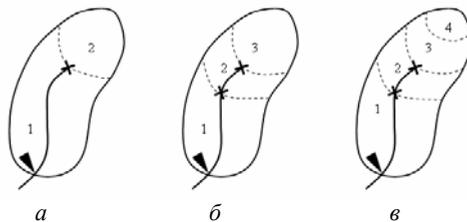


Рис. 3. Схемы водосборов с различными участками питания реки.

1 – участок водосбора с постоянным стоком в русле; 2 – площадь начального стока;

3 – площадь с временным отсутствием стока; 4 – бессточная площадь

При эпизодическом отсутствии стока, т.е. в наиболее засушливые (или морозные) годы, в верховьях рек образуется площадь с временным отсутствием стока (рис. 3, б). Верховья реки пересыхают и ее начало сдвигается по руслу до того места, где выклинивается следующий, более глубокий, водоносный горизонт, в котором еще не иссякли запасы подземных вод. Убыль воды из этого горизонта ведет к дальнейшему отступанию воды по руслу. Увеличивается продолжительность пересыхания и длина пересохшего русла. В лесной зоне пересыхание длится обычно недолго и на относительно небольшие расстояния. Поэтому пересыхают лишь малые реки в наиболее засушливые годы.

В зоне недостаточного увлажнения площадь с временным отсутствием стока интенсивно увеличивается. В бассейнах рек ежегодно появляется площадь с постоянным отсутствием стока в засушливый сезон (рис. 3, в).

Размеры площади с временным отсутствием стока и бессточной площади будут меняться во времени в зависимости от водности меженного периода. Чем длительнее меженный период и меньше его водность, тем больше должны быть размеры площадей, не получающих с них никакого питания.

В районах с наличием ежегодно пересыхающих или перемерзающих рек размеры площади с отсутствием стока можно определить, анализируя изменение расходов воды с увеличением площади водосбора. В основу положена формула, разработанная автором и опубликованная в нормативных документах Госстроя России [СП 33-101-2003], имеющая вид:

$$Q_{p\%} = b(A \pm A_1)^m \delta_1 \delta_2 \lambda p_{\%}, \quad (2)$$

где $Q_{p\%}$ – минимальный расход воды расчетной обеспеченности; A – площадь водосбора.

В период ежегодного отсутствия стока на малых водосборах параметры $\delta_1, \delta_2, \lambda p_{\%}$ не учитываются. Значение A_1 определяется по районному графику, показывающему связь минимальных суточных расходов воды ($Q_{\text{СУТ.}}$) 97%-й обеспеченности с площадью водосбора (A). В этом случае A_1 характеризует площадь с временным отсутствием стока и бессточную площадь, что соответствует началу линии связи $Q_{\text{СУТ.}} = f(A)$, описываемой уравнением:

$$Q_{\text{СУТ.}} = b(A - A_1)^m. \quad (3)$$

Учитывая, что целью расчета является не расход воды, а размер площади водосбора с отсутствием стока, то значение A_1 целесообразно уточнить за счет расчета площади начального стока (A_2). Для этого можно принять за начало стока расход воды, равный $0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,1 \text{ л/с}$).

Тогда

$$A_2 = \sqrt{Q_{\text{сут.}} / b} = \sqrt[3]{0,0001 / b}. \quad (4)$$

Эту формулу можно использовать непосредственно для расчетов площади начального стока. Сумма площадей (A_1 и A_2) дает общий размер площади водосбора, не имеющей стока в русловой сети. В маловодный сезон наиболее маловодного года размеры этой площади являются наибольшими.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 07-05-01037.

Литература

1. *Владимиров А. М.* Сток рек в маловодный период года. – Л.: Гидрометеиздат, 1976.
2. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Стройиздат, 2004. – 72 с.

Ключевые слова: минимальный сток, период прекращения стока, гидрологическая засуха, водоносный горизонт, пересыхание, перемерзание.