

*А.М. Владимиров*

## КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЗАСУХ

*A.M. Vladimirov*

## CLASSIFICATION OF HYDROLOGICAL DROUGHT

*Предложено понятие гидрологической засухи и названы ее признаки, дана классификация существующих засух на территории России с учетом их продолжительности и температуры воды, воздуха и почвы. Подчеркивается роль гидрогеологических факторов и метода многокритериального оценивания факторов формирования гидрологической засухи.*

*Ключевые слова: засуха, классификация, подземный сток, атмосферная засуха, почвенная засуха.*

*The concept of hydrological drought is given, features of drought are determined. The classification of drought in Russia is proposed, taking into account the duration and temperature of water, air and soil. The role of hydrogeological factors and the multi-factors method of estimation in the formation of hydrological drought is investigated.*

*Keywords: drought, classification, groundwater flow, atmospheric drought, soil drought.*

В науке и практике гидрометеорологии существует лишь два понятия засухи, согласно [7]: атмосферная и почвенная. Под атмосферной засухой понимают значительный по сравнению с нормой недостаток осадков в течение длительного времени при одновременно высокой температуре воздуха и пониженной его влажности. Но при этом остаются неопределенными критерии терминов «значительный», «высокий» и «пониженный». Их численные значения могут быть весьма разными и зависят от целого ряда факторов. Под почвенной засухой понимают иссушение почвы в период атмосферной засухи, таким образом, она является ее следствием. Степень же иссушения почвы остается также неопределенной, поскольку сухость почвы также понимается по-разному.

В целом засуха рассматривается только как очень неблагоприятное гидрометеорологическое явление, влекущее за собой недостаточную обеспеченность растений водой. Указанное понимание засухи является весьма односторонним. Оно относится лишь к агротехническому комплексу, а отсутствие общепринятых количественных критериев приводит к различным временным периодам засухи на одной и той же территории, определяемой разными авторами при анализе ее циклических колебаний.

Засуха может относиться к катастрофическому явлению, когда неурожай наступает на очень больших территориях и происходит резкое снижение продовольственных запасов вплоть до голода населения, массовой гибели сельскохозяйственных животных. Хотя в настоящее время подобное быстро ликвидируется с помощью других районов и стран, не испытавших засуху. Но природное явление продолжает относиться к катастрофическому, поскольку процесс засухи имеет необратимый характер, приводящий к очень большому экономическому и экологическому ущербу.

Атмосферная засуха является сугубо метеорологическим понятием, в котором в водном балансе территории основную роль играет испарение. Длительное превышение испарения над осадками ведет к отрицательному водному балансу в период засухи и чем оно больше, тем суровее засуха. Но это справедливо лишь для климатических зон, в которых постоянно существует положительный годовой водный баланс, а испарение не сильно отличается от испаряемости. Поэтому понятие засухи в аридных зонах, где в количественном выражении они различаются в десятки и даже сотни раз, применять термин «засуха» не целесообразно.

Засуха в России относительно часто наступает в бассейне р. Дон, в нижнем и частично среднем течении р. Волги, в Предкавказье, в Прикаспии, на юге Западной Сибири. Реже она происходит в Центральных районах Европейской территории, в Бурятии и Центральной Якутии.

Наиболее продолжительными засухи бывают в зоне с полуаридным климатом. Климат сухих степей, полупустынь и пустынь в данном случае не рассматривается.

Естественно, что в зоне недостаточного увлажнения засухи охватывают намного большие территории и случаются значительно чаще. Поэтому изучение частоты их появления являются весьма важным вопросом. Однако прежде всего необходимо выяснить, какого типа засухи бывают вообще и могут причинять наибольший ущерб обществу и природе.

Атмосферная (метеорологическая по [4]) засуха возникает в случае очень длительного стояния малоподвижного антициклона на обширной территории в летний сезон. Высокие температуры воздуха и почвы при отсутствии осадков способствуют резкому увеличению потерь воды на испарение с поверхности и с толщи почвогрунтов. Чем длительнее период отсутствия осадков и высокой температуры, тем сильнее и глубже иссушаются почвогрунты речных водосборов, тем интенсивнее истощаются верхние горизонты подземных вод. К атмосферной засухе подключается почвенная (агроклиматическая [4]) засуха, особенностью, которой является то, что почвенная засуха может по-разному действовать на развитие сельскохозяйственных культур и их урожайность, а также на луговую растительность. При этом большое значение имеет тип почв, используемых для выращивания сельскохозяйственных культур, поскольку они имеют разную влагоемкость и водоотдачу, а также тип растительности, испаряющий воду.

Как уже отмечалось выше, выделение лишь двух видов засух является недостаточным, так как почвенная засуха способствует возникновению гидрологической засухи, являющейся продолжением почвенно-атмосферной засухи. Увеличение продолжительности почвенной засухи ведет к истощению и в дальнейшем иссушению верхних водоносных горизонтов подземных вод, питающих водоотдачи. Происходит высыхание колодезев. Прекращается сток родников, питавшихся из верхних водоносных горизонтов.

Возникает и увеличивается бессточная площадь данного водотока. Следствием является довольно быстрое уменьшение расходов воды и падение ее уровня в замыкающем створе реки, вплоть до ее пересыхания. На территории, подверженной засухе, малые реки пересыхают (высыхают), сток средних рек начинает существовать только в результате притока подземных вод из глубоких водоносных горизонтов. На больших реках уменьшение расходов воды и падение уровней будет зависеть не только от притока воды средних рек и из глубоких водоносных горизонтов, но и в какой мере охвачена засухой ее водосбор и какие климатическая и растительная зоны попали в район засухи.

При длительной засухе происходит высыхание на водосборе водотока переувлажненных и заболоченных земель, торфяных залежей, особенно осушенных при мелиоративных работах. В результате возникают торфяные и лесные пожары, приводящие к катастрофическому исходу. Это ярко показало лето 2010 г., когда горели леса и высохшие торфяники в зоне достаточного увлажнения, а жители Москвы задыхались от дыма горящих торфяников Подмосковья.

Быстрое падение уровней воды в судоходных реках представляет угрозу для судоходства, вплоть до прекращения движения судов. Такие примеры были на реках Волге, Лене, Дунае. Падение уровней воды в водохранилищах заставляет снижать выработку электроэнергии на ГЭС. Повышение температуры воды в водохранилищах — охладителях в период засухи также снижает выработку энергии в АЭС и затрудняет их работу. Возникают проблемы с водоснабжением при использовании речных вод для бытового и промышленного потребления, для орошения.

Таким образом, выделение гидрологической засухи как отдельного вида засух целесообразно и необходимо, тем более что она имеет свою особенность в происхождении.

В период длительной засухи находящаяся в речном бассейне вода ( $Q_6$ ) расходует-ся на сток из бассейна ( $Q_{ст}$ ), на испарение ( $E$ ) и на водопотребление ( $Q_{вп}$ ), т.е. в русле остается лишь расход  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q = Q_6 - Q_{ст} - E - Q_{вп} . \quad (1)$$

Для малой реки запасы воды в бассейне не велики, поскольку объем его небольшой, если границы подземного бассейна совпадают с поверхностным водосбором. В период засухи испарение с поверхности водосбора резко увеличивается. Поэтому сработка накопленной в бассейне воды происходит быстро и сток прекращается. Этому же способствуют местные водозаборы из русла, прудов, из неглубоких скважин. В результате  $\Delta Q$  превращается в ноль.

К малым рекам обычно относят реки с площадью водосбора до 2000 км<sup>2</sup> [7]. При обычных (средних) условиях увлажнения территории сток малых рек в зоне достаточного увлажнения не прекращается круглогодично. Однако в маловодные годы пополнение запасов подземных вод в весенний период происходит незначительно и при отсутствии летних осадков они могут сработаться полностью в меженный период.

Сток средних рек, к которым относят реки с площадью водосбора до 50 тыс. км<sup>2</sup> [7], более устойчив во времени. Запасы воды в их бассейнах являются большими и их сработка более разнообразна и динамична во времени и по территории. Сработка запасов подземных вод, накопленных в многоводный период, может происходить в

течение нескольких лет. Поэтому маловодье данного года при всей сухости летнего периода может не достигать крайнего минимума стока вследствие сработки воды, накопленной в предшествующий год или годы. Максимальная сработка подземных вод произойдет лишь при сработке запасов предшествующих лет и данного года, точнее весенне-летнего сезона. Примером может служить засуха 1972 г., случившаяся на Европейской территории СССР. Наибольшее истощение речного стока было в бассейнах рек Волга, Дон, Нева, Сухона [6] на малых и средних реках с площадью водосбора до 15000 км<sup>2</sup>. Однако в лесной зоне пересыхали лишь часть малых рек в Ленинградской и Московской областях с площадями 10-100-300 км<sup>2</sup>. В бассейнах с наличием карста, озер, неосушенных болотных массивов или других аккумуляторов влаги истощение речного стока происходило более замедленно, чем там, где не имелись подобные аккумуляторы влаги или не было хорошо обводненных комплексов водосодержащих пород. Продолжительность пересыхания части малых рек была в лесной зоне до месяца, а в лесостепной и степной зонах отсутствовал большее время на реках с площадями водосборов до 1500-2500 км<sup>2</sup>.

Классификация гидрологических засух относится к категории частных классификаций из комплекса засух, включающих, как указано выше, еще атмосферную и почвенную. На практике они могут происходить одновременно или последовательно во времени.

Начинается засуха обычно с атмосферной переходящей в почвенную. Гидрологическая засуха является последним звеном в цепи засух и свидетельствует о наибольшем истощении водных ресурсов конкретной территории. Однако гидрологическая засуха может наступить в период маловодья (межени) и при относительно достаточной влажности почвы при выпадении осадков из-за истощения питающих водоотки водоносных горизонтов.

Каждая из вышеуказанных засух может иметь весьма разную продолжительность, но в любом случае она длится неделями и даже месяцами. В этот период отсутствуют или практически отсутствуют (незначительные) осадки. В этот же сезон температура воздуха является наиболее высокой. Лишь в конце засухи она может существенно снижаться.

Засуха и ее последствия отражаются непосредственно на человеке, ограничивая его водопотребление и водопользование, на сельском хозяйстве, на экологии.

Признаком гидрологической засухи является довольно быстрое снижение уровня воды в реках, озерах и водохранилищах, а также в колодцах и уменьшение ежедневных расходов воды в реках. Экстремальным проявлением гидрологической засухи будет прекращение стока воды в обычно не пересыхающих водотоках, высыхание прудов и малых водохранилищ, но не в результате их интенсивного использования, а также высыхание малых озер, обычно содержащих воду в течение всего года.

В качестве признаков классификации засух используются следующие естественные характерные факторы: температура и влажность физической среды (воздух, вода, почва), уровни и расходы воды в водных объектах, а также продолжительность стояния этих факторов в их экстремальном значении.

Атмосферная засуха начинается с появлением малоподвижного глубокого обширного антициклона с высокими температурами воздуха, который обуславливает малую влажность воздушной массы. Это вызывает иссушение почвы и как следствие возникает почвенная засуха.

Гидрологическая засуха начинается с прекращением стока в малых водотоках (ручьях) и углубляется с увеличением бессточных площадей в речных бассейнах [5]. В это же время на водоемах начинается постоянное и довольно интенсивное падение уровней воды. Атмосферная и почвенная засухи заканчиваются с началом выпадения существенных осадков, превышающих потери на испарение. Гидрологическая засуха прекращается лишь после того, как начнется приток поверхностных и подземных вод в реки и озера данного бассейна.

Указанные засухи имеют разную продолжительность в один и тот же сезон и меняющиеся во времени и среде температурные характеристики. По продолжительности засухи целесообразно разделить на короткие и длительные. Как показывает практика, засуха атмосферная, переходящая в почвенную начинает приносить существенный хозяйственный ущерб при ее продолжительности в 20-30 суток. При большей длительности засухи этот ущерб может перерасти в катастрофический. Подобное показали засухи в 20-х, 30-х, 40-х и 70-х гг. XX в. и засуха 2010 г. на Европейской территории России.

При классификации водных объектов классифицируют отдельно реки и водоемы. Существует довольно большое количество разного рода классификаций рек и озер, использующих показатели морфологические, морфометрические, морфогенетические, гидрологические, гидрофизические, гидрохимические, экологические. Каждая классификация, прежде всего, отражает основную задачу при решении поставленной цели. Но как показывает анализ классификаций, многие из них учитывают прямо или косвенно основные морфометрические характеристики водотоков и водоемов. При классификации по морфометрическим показателям таковыми являются площадь и объем водного объекта. Для водотоков – это площадь поверхности его водосбора, а для водоемов площадь его поверхности и объем заключенной в нем воды. Объем воды в конкретном речном бассейне можно определить, используя данные о расходе воды и соответствующем уровне воды, находящейся в речной сети. Определение объема подземного бассейна связано с большими трудностями, обусловленными необходимостью определения геологического и гидрогеологического строения подземного бассейна и установления его границ.

Большое значение имеет глубина вреза русел водотоков в поверхность водосборов. Она в значительной мере определяет количество поступающей воды в русло из водоносных горизонтов, дренируемых рекой. В меженный период подземные воды преобладают в речном стоке, а в период засухи определяют само существование водотока. Поэтому гидрологический фактор имеет не менее важное значение, чем климатический. Мощность водоносного горизонта, питающего реку, зависит от его площади и толщины, пористости водосодержащей породы, а интенсивность питания от уклона водоносного горизонта, т.е. в основном от морфометрических факторов.

Количество водоносных горизонтов, вскрываемых водотоком, увеличивается с ростом длины реки и площади ее поверхностного водосбора. Следовательно кроме климатических и гидрогеологических не менее важными являются и морфометрические факторы, отражающие поверхностные и подземные характеристики речного водосбора. Однако информация об этих факторах обычно является недостаточной как в количественной, так и качественной формах. Например, имеются сведения о преобла-

дающем типе почво-грунтов или о породе слагающей речной бассейна, но отсутствуют границы этих пород и границы водоносных горизонтов. Обычно нет данных о размерах бессточной части и ее динамики во времени [2]. При этом даже количественные характеристики речного водосбора имеют различную точность измерений.

Таким образом, исходная гидрометеорологическая, гидрогеологическая, морфометрическая, как и другая природная информация имеют элемент неопределенности и недостаточности. Поэтому при оценке роли различных факторов в формировании гидрологической засухи целесообразно использовать теорию стохастического моделирования дефицита информации и неопределенности суждений о приоритетах оценивания сводных показателей, используя метод рандомизирования этих показателей [5]. Эта теория была успешно реализована Н.В. Мякишевой при классификации озер [6].

Теоретическую основу метода многокритериального оценивания показателей составляют принципы линеаризации, арифметизации и рандомизации [8]. Для этого определяется система показателей, устанавливающих состояние рассматриваемого водного объекта. Исходные параметры приводят к единой безразмерной шкале с последующим получением комплексного показателя состояния водного объекта. Для последнего устанавливают весовые коэффициенты отдельных частных показателей. Однако определение этих коэффициентов, в случае оценки лишь одним специалистом, носит элемент субъективизма. Поэтому целесообразно использовать принцип экспертной оценки, когда в качестве экспертов используют литературные данные ряда авторов в рассматриваемой области, имеющие свое мнение по данному показателю. Обобщенное или усредненное мнение будет считаться более надежным. Подобное было сделано А.М. Владимировым при подготовке нормативного документа [3].

Весь комплекс факторов, формирующих гидрологическую засуху на конкретном речном бассейне, можно описать уравнением

$$C = n_1 K + n_2 \Gamma + n_3 M, \quad (2)$$

где  $C$  – комплексный индекс;  $K$  – климатический индекс;  $\Gamma$  – гидрогеологический индекс;  $M$  – морфометрический индекс;  $n$  – весовой коэффициент.

Каждый индекс состоит из суммы показателей, характеризующих основные физические факторы, влияющие на формирование засухи. Они, в свою очередь, имеют весовые коэффициенты для рассматриваемого показателя.

Так, весовой коэффициент для показателя, характеризующего температуру воздуха, в период засухи будет явно больше, чем осадков, а о весе испарения могут быть разные мнения. В зоне достаточного увлажнения испарение в период засухи приближается или равно испаряемости, а в зоне недостаточного увлажнения оно резко увеличивается, но далеко не достигает испаряемости, поскольку отсутствует необходимое для этого количество воды. Разница между многолетними годовыми испарением и испаряемостью в бассейнах низовьев рек Дона и Волги составляет в среднем 200 %. При этом существует корреляционная связь температуры и испарения.

Комплексный показатель для конкретного индекса, например, для климатического, можно выразить уравнением вида:

$$C_1 = \sum m_i K_i, \quad (3)$$

где  $m$  – степень значимости отдельного показателя.

Для решения проблемы неопределенности выбора весовых коэффициентов предложено использовать байесовскую модель рандомизации неопределенности [8]. Суть которой заключается в переходе от неопределенного выбора весовых коэффициентов к их случайному (рандомизированному) выбору из множества, т.е. рассчитать случайные весовые коэффициенты и рандомизированные сводные показатели.

Использование методов комбинаторной математики, а также метода Монте-Карло позволяет получить числовые оценки весовых коэффициентов в виде математического ожидания соответствующих рандомизированных весов комплексных показателей, а их сумма согласно уравнению (3), дает рандомизированный сводный показатель, являющийся случайной величиной, распределенный на интервале от 0 до 1. Обобщенной оценкой послужит математическое ожидание рандомизированного сводного показателя, а затем и комплексного индекса.

Ранжирование весовых коэффициентов факторов (показателей и индексов) позволяет выявить основные и второстепенные физико-географические, антропогенные и экологические факторы, определяющие вероятность появления и продолжительность гидрологической засухи.

Таким образом, существующие в летний сезон засухи можно классифицировать:

- по виду засухи, выделяя метеорологическую (атмосферную), почвенную (агроклиматическую) и гидрологическую;
- по продолжительности засухи, выделив короткую (продолжительность до 30 суток) и длительную (свыше 30 суток);
- по температуре среды (воздуха, почвы, воды) она может быть высокой и очень высокой.

В зависимости от окружающей среды высокой целесообразно считать температуру воздуха до 30 °С и очень высокой свыше 30 °С; температуру почвы высокой до 40 °С, а свыше 40 °С считать очень высокой; температуру воды считать высокой до 28 °С и очень высокой свыше 28 °С. Основным критерием является комфортность человека, растений и рыб. При высокой температуре создаются предпосылки засухи. При очень высокой температуре воздуха, почвы или воды начинаются весьма опасные биологические и экологические явления. Повышается смертность людей в результате сердечно-сосудистых заболеваний, высыхают растения (прежде всего сельскохозяйственные), происходят заморы рыбы в результате развития вредных водорослей (особенно сине-зеленых) и резкого уменьшения содержания кислорода в воде рек и особенно озер и водохранилищ; ухудшается качество питьевой воды.

Гидрологическая засуха связана с почвенной и атмосферной, но наиболее тесно эта связь проявляется при наибольшей их продолжительности, когда атмосферно-почвенная засуха становится экстремально длительной и повторяется в следующем году. Небольшое по времени (до 15 суток) отсутствие стока в водотоках целесообразно считать пересыханием на короткое время. Оно может наблюдаться на малых реках

лесной зоны (зона достаточного увлажнения). В зоне недостаточного увлажнения малым водотокам свойственно пересыхать на длительный срок.

В таблице отражены признаки и критерии, характерные для зон достаточного и частично недостаточного увлажнения для водотоков и водоемов, подвергающихся эпизодическим засухам. Ежегодно пересыхающие водотоки и водоемы зоны недостаточного увлажнения должны иметь другие временные критерии, относящиеся к малым водным объектам естественного происхождения и не испытывающие антропогенного влияния (водозаборы, сбросы, наличие небольших водохранилищ). Видимым признаком возможности возникновения гидрологической засухи будет появление на гидрографах стока или уровней постоянное длительное падение уровней и расходов воды, вплоть до пересыхания.

**Классификация засух**

Тип засухи	Признак засухи	Основной фактор засухи		Продолжительность	
		характеристика	критерий	короткая	длительная
Атмосферная	Длительное отсутствие	$t^\circ$ воздуха	более $30^\circ$	до 30 сут.	более 30 сут.
Почвенная	Пересыхающая почва	$t^\circ$ почвы	более $40^\circ$	до 30 сут.	более 30 сут.
Гидрологическая	Прекращение стока или резкое падение уровня воды	расход воды уровень воды	отсутствие наименьший	до 15 сут. до 15 сут.	более 15 сут. более 15 сут.

**Литература**

1. *Владимиров А.М.* Необычайное маловодье на реках Европейской территории Советского Союза летом 1972 г. — Метеорология и гидрология, № 10, 1974, с.75-80.
2. *Владимиров А.М.* Факторы формирования экстремального стока в маловодный сезон. — СПб, Ученые Записки РГГМУ, № 7, 2008, с. 13-22.
3. ГОСТ 17.1-1.02-77. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов. — М.: Госстандарт, 1977. — 21 с.
4. *Дроздов О.А.* Засухи и динамика увлажнения. — Л.: Гидромеиздат, 1980. — 95 с.
5. *Корников В.В., Серегин И.А., Хованов Н.В.* Байесовская модель обработки нечисловой, неточной и неполной информации о весовых коэффициентах. Сб. докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, т. 1. — СПб, 2000, с. 104-107.
6. *Мякишева Н.В.* Многокритериальная классификация озер. — СПб.: изд. РГГМУ, 2009. — 159 с.
7. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 1. — СПб, Летний сад, 2008. — 333 с.
8. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. — СПб.: изд. СПбГУ, 1996. — 195 с.