

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЗАСУХЕ. Н. СУМАК^{1), 2)}¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь²⁾Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Засуха является одним из крупнейших стихийных бедствий в жизнедеятельности человечества. По основным показателям негативного воздействия она занимает лидирующие позиции среди других опасных гидрометеорологических явлений. Под влиянием глобальных климатических изменений проблема усиления засушливости в разных частях планеты, особенно в аграрных регионах, стала крайне острой. Ожидается, что в долгосрочной перспективе глобальная температура продолжит повышаться, возрастет пространственно-временная неравномерность выпадения осадков, что приведет к дальнейшему увеличению риска возникновения засух в засушливых регионах. По этой причине мониторинг и прогнозирование засушливых явлений актуальны как при проведении научных исследований, так и при решении прикладных задач. В статье представлены основные принципы оценки засух и параметры, которые наиболее часто применяются для мониторинга засух в мире. Показана роль атмосферных процессов в возникновении и эволюции засух. Рассмотрена система мониторинга и оценки засушливых явлений, используемая в Республиканском центре по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды для агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства Беларуси.

Ключевые слова: засуха; методы оценки засух; мониторинг засух; индикаторы засух; индексы засух.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность профессору Одесского государственного экологического университета доктору географических наук И. Г. Семёновой и сотрудникам отдела агрометеорологии службы гидрологии и агрометеорологии Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды за консультации и ценные рекомендации в процессе написания статьи.

Образец цитирования:

Сумак ЕН. Обзор современных методов исследования и мониторинга засух. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;2:91–106.
EDN: SXPGDD

For citation:

Sumak KM. Review of modern methods of drought research and monitoring. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;2:91–106. Russian.
EDN: SXPGDD

Автор:

Екатерина Николаевна Сумак – кандидат географических наук; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики¹⁾, ведущий инженер-синоптик отдела краткосрочных прогнозов погоды, неблагоприятных и опасных явлений службы метеорологических прогнозов²⁾.

Author:

Katsiaryna M. Sumak, PhD (geography); associate professor at the department of the general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^a, and leading weather forecaster at the department of short-term weather forecasts, adverse and dangerous phenomena, weather forecasting service^b.
kasyasbelarus@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5762-5501>

REVIEW OF MODERN METHODS OF DROUGHT RESEARCH AND MONITORING

K. M. SUMAK^{a, b}

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bRepublican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination
and Environmental Monitoring, 110 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus

Abstract. Drought is one of the largest natural disasters in human life. According to the main indicators of negative impact, it occupies a leading position among other dangerous hydrometeorological phenomena. Under the influence of global climate change, the problem of increasing aridity in different parts of the planet, especially in agricultural regions has become extremely acute. It is expected that in the long term, global temperatures will continue to rise, spatial and temporal variability of precipitation will increase, which will lead to a further increase in the risk of droughts in arid regions. For this reason, monitoring and forecasting drought events are relevant both in scientific research and in solving applied problems. This article presents the basic principles of drought assessment and the parameters that are currently most often used in the world for drought monitoring. The role of atmospheric processes in the formation and evolution of droughts is shown. The system of monitoring and assessment of drought phenomena used in the Republican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring for agrometeorological support of agriculture of Belarus is considered.

Keywords: drought; methods of drought assessment; drought monitoring; indicators of droughts; indices of droughts.

Acknowledgements. The author expresses deep gratitude to professor of the Odessa State Ecological University, doctor of science (geography) I. G. Semenova and the staff of the department of agrometeorology of the hydrology and agrometeorology service of the Republican Centre for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring for consultations and valuable recommendations in the process of writing this article.

Введение

Засуха – опасное гидрометеорологическое явление высокой степени воздействия, которое требует совершенствования методик наблюдения и прогнозирования в связи с участвовавшими в условиях изменения климата эпизодами засух во всех регионах Земли. Уже сейчас потери от воздействия засухи в Европейском союзе и Великобритании достигают 9 млрд евро в год, и при отсутствии действий, направленных на снижение глобальной температуры до 2100 г., а также мер по адаптации к изменениям климата потери могут возрасти до более чем 65 млрд евро в год [1].

Засухи различной интенсивности и продолжительности часто отмечаются в Восточной Европе. За последние 75 лет из-за увеличения количества осадков в холодное время года интенсивность и частота засух снизились в Эстонии, Латвии, Литве, северных частях Беларуси и Польши. Летом, напротив, наблюдалась тенденция к усилению засух в южных регионах – Чехии, Словакии, Венгрии, Румынии, Молдове, на юге Польши [2].

Южные регионы Восточной Европы особенно подвержены засухе в теплое время года в связи с преобладанием антициклонических полей, которые способствуют высушиванию воздуха и почвы из-за интенсивного радиационного прогрева и отсутствия осадков [3; 4]. Засушливые периоды, особенно весной и летом, наносят значительный ущерб сельскому хозяйству, что приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Так, засушливый сезон 2019–2020 гг. в Украине, вызванный длительным отсутствием осадков и теплой зимой, был сильнее всего с 1947 г. Снижение влажности почвы привело к гибели 80 % посевов в юго-западных регионах страны весной 2020 г., что имело разрушительные последствия для региональной экономики [5].

В Беларуси ежегодно бывает 3–4 периода, когда атмосферные осадки отсутствуют в течение 10 сут, раз в 2 года наблюдается отсутствие осадков на протяжении 20–25 сут, а раз в 10 лет – на протяжении 30–35 сут¹. Например, с 21 мая по 10 августа 1999 г. на территории республики установилась аномально сухая погода практически без дождей. В начале июня запасы продуктивной влаги в почве достигали критически низких значений. Почвенная засуха сопровождалась сушевыми явлениями. Температурный фон в летние месяцы оказался на 2–4 °С выше средних многолетних значений. Установившаяся и продолжавшаяся в течение 82 сут засуха привела к повреждению и гибели многих сельскохозяйственных культур.

¹Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : учеб. пособие / В. Ф. Логинов [и др.]. М. : Мещер. фил. ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2016. 58 с.

В конце XX – начале XXI в. повторяемость засушливых явлений в Беларуси участилась. Значительные последствия для экономики страны имели засухи 1990, 1992, 1994–1997, 2001, 2002, 2004, 2006, 2009, 2010, 2012, 2015 и 2018 гг. [6; 7]. Дефицит осадков сопровождался повышенным температурным режимом, что усилило неблагоприятные хозяйственные последствия².

Отсутствие универсального определения засухи и многообразие методов оценки являются проблемой при выборе наиболее эффективного принципа мониторинга засух, что порождает необходимость в адаптации существующих методик и разработке оригинальных подходов, учитывающих как физический механизм возникновения и эволюции засухи, так и влияние географических и климатических особенностей региона исследования [5]. В данной обзорной статье рассмотрены основные принципы оценки засух и параметры, которые в настоящее время наиболее часто применяются для мониторинга засух в мире.

Сущность, определение и последствия проявления засух

Наиболее общее определение засухи обычно сводится к такому понятию, как отсутствие осадков в течение длительного периода, приводящее к нехватке доступной влаги. Подобные условия могут отмечаться в любом климате, что делает засуху универсальным природным явлением, обнаружение которого требует тщательного подхода и учета многих факторов, характерных для конкретного региона. Сложность определения засухи наглядно демонстрирует тот факт, что уже в начале 1980-х гг. различными исследователями были опубликованы более 150 определений засухи, отражающих различия в регионах, отраслях и подходах. Некоторые определения засухи являются концептуальными и могут иметь важное значение при разработке политики в отношении засухи. Другие определения оперативные, они описывают развитие и воздействие засухи доступными методами измерения и оценки.

Естественная засуха – это отклонение метеорологических, сельскохозяйственных и гидрологических параметров (например, количества осадков, влажности почвы, речного стока, уровня грунтовых вод и т. д.) от климатических норм. Дефицит влаги, обусловленный погодными условиями, проявляется в отрицательных аномалиях количества осадков, влажности почвы и речного стока, связанных соответственно с метеорологическими, сельскохозяйственными и гидрологическими засухами. Социально-экономическая засуха определяется как недостаток воды для удовлетворения потребностей человеческой деятельности из-за погодных условий³ [8].

Засуха представляет собой комплексное явление, связанное с компонентами гидрологического цикла, рассмотрение которого необходимо для установления той среды и того периода, в которых возникает дефицит влаги [9]. При этом у засух, как и у взаимосвязанных засушливых явлений (бездождевой период, суховей), есть определенные граничные критерии, при превышении которых они становятся опасными.

Рассмотрим взаимосвязь разных типов засух в последовательности их развития. Метеорологическая, или атмосферная, засуха возникает в условиях отсутствия осадков на фоне высоких температур и низкой влажности, что является следствием высокой степени инсоляции при отсутствии облачности [3; 10]. Такое сочетание метеорологических параметров приводит к увеличению испарения, с одной стороны, и к уменьшению поверхностного стока, инфильтрации и накоплению подземных вод, с другой стороны. Метеорологические засухи могут быстро начинаться и внезапно заканчиваться в результате выпадения обильных осадков. Но в условиях длительного недобора осадков запасы влаги в почве без их пополнения дождевой водой постепенно истощаются [5]. Приток воды к растениям через корневую систему уменьшается, а расход влаги на транспирацию начинает превышать ее поступление из почвы, что нарушает нормальные условия фотосинтеза и углеродного питания растений. В таких случаях говорят о переходе от метеорологической засухи к сельскохозяйственной, или почвенной, засухе, которая выражается прежде всего в формировании устойчивого дефицита влаги в почве, что негативно сказывается на растениях, вызывая у них стресс, уменьшение биомассы и снижение урожайности, а иногда приводит к гибели растений.

Сельскохозяйственная засуха чаще понимается именно как нехватка воды в почве для поддержания роста сельскохозяйственных культур и кормов, чем как отсутствие достаточного количества осадков в течение определенного периода. Связь между выпадением осадков и их инфильтрацией в почву обычно не прямая. Скорость инфильтрации варьируется в зависимости от предшествующих условий влажности, уклона поверхности, типа почвы и интенсивности выпадения осадков. Характеристики почвы тоже различаются. Так, некоторые почвы обладают более высокой влагоудерживающей способностью, что делает

²Климат Республики Беларусь в 2015 году / М. Г. Герменчук [и др.] ; Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу окружающей среды ; под общ. ред. М. Г. Герменчук. Минск, 2016. 32 с.

³American Meteorological Society. Drought // American Meteorological Society : website. Boston, 2013. URL: <https://www.amet-soc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/drought/> (date of access: 30.01.2021).

их менее уязвимыми для засухи. Потребности растения в воде также определяются весьма широким набором факторов: текущими погодными условиями, биологическими характеристиками данного вида растений и стадией его развития на момент формирования дефицита влаги. Например, дефицит влаги в верхнем слое почвы при посеве может привести к затруднению прорастания семян и уменьшению всходов. Однако если впоследствии дефицит влаги в верхнем слое почвы исчезает благодаря погодным условиям и выпадению осадков в течение вегетационного периода, то засуха в начале развития растений может практически не повлиять на будущий урожай.

Сочетание атмосферной и почвенной засух приводит к возникновению общей засухи, которая является особенно опасной для растений из-за невозможности их питания влагой из почвы на фоне высоких температур воздуха и отсутствия осадков.

В зависимости от сезона возникновения и продолжительности в течение вегетационного периода сельскохозяйственные засухи подразделяются на три типа: весенние, летние и осенние [3]. Весенняя засуха характеризуется низкими температурой и относительной влажностью воздуха и сопровождается суховейными явлениями. Этот тип засухи задерживает фазу всходов, ослабляет кущение и ухудшает укоренение растений, уменьшает количество заложённых колосьев в колосе. Однако если весной в почве будет достаточно влаги, то засуха мало повлияет на будущий урожай.

Летняя засуха характеризуется высокими температурами в условиях высокой инсоляции, низкой относительной влажностью воздуха и значительной испаряемостью. Пагубное воздействие летней засухи на посевы обычно сильнее, поскольку к моменту ее возникновения запасы почвенной влаги часто являются намного меньшими, чем весной. Летняя засуха отрицательно влияет на вегетативный рост и состояние корневой системы, что снижает качество будущего урожая. На территории Восточной Европы нередко весенне-летние засухи, когда засушливые явления наблюдаются в течение последовательных сезонов, набирая интенсивность. Наиболее яркий пример такой сильной засухи, условия которой были заложены еще в зимний период, отмечен на территории европейской части России в 2010 г. [11]. Холодная зима 2010 г. способствовала возникновению весеннего дефицита влаги в почве, и уже в мае на юге региона сложились засушливые условия, которые на протяжении июня – августа распространились от Поволжья во всех направлениях вплоть до северных районов европейской части России, где засуха никогда не наблюдалась. В то же время с мая по август интенсивность засухи возрастала, достигая сильных и экстремальных значений в юго-восточных районах европейской части России.

Осенняя засуха возникает при понижении температуры воздуха. Как правило, после летнего периода верхний слой почвы значительно высушен, и при дальнейшем сохранении дефицита осадков осенью почвенная засуха усиливается. Посеянные в таких условиях озимые культуры не могут нормально развиваться и часто погибают во время зимовки. Одним из ярких примеров интенсивной осенней засухи является осень 2011 г. в Украине, когда в результате преобладания антициклонических полей над южными регионами Восточной Европы в течение всех трех осенних месяцев осадков практически не наблюдалось [12]. На одной трети засеянных озимыми культурами площадей всходы не появились вообще, а взшедшие озимые были ослаблены и не перенесли зиму, что привело к необходимости пересева значительной части полей весной следующего года.

Дальнейшая эволюция засушливых условий от метеорологических и сельскохозяйственных засух может привести к гидрологической засухе, которая проявляется в уменьшении речного стока, снижении уровней водохранилищ и озер, высыхании болот и сокращении естественной среды обитания дикой природы. Как и при сельскохозяйственной засухе, нет прямой связи между осадками и запасами поверхностных и подземных вод в озерах, водохранилищах и ручьях, поскольку эти компоненты водной системы используются для различных, в том числе конкурирующих, целей, таких как орошение, борьба с наводнениями, производство гидроэлектроэнергии, бытовое водоснабжение, туризм, защита окружающей среды и экосистем и др. Следует учитывать, что из-за обширности гидрологической системы, связывающей разные регионы, площадь распространения гидрологической засухи может быть существенно больше и выходить за границы региона, где первоначально сформировалась метеорологическая засуха, приведшая впоследствии к гидрологической засухе [9].

Сочетание перечисленных типов засух характеризует социально-экономическую засуху, последствия которой проявляются как в жизнедеятельности человека, так и в окружающей среде. Социально-экономическая засуха существенно отличается от других типов засух, поскольку она отражает взаимосвязь между спросом и предложением на определенные товары или экономические блага (например, воду, корм для животных, гидроэлектроэнергию), которые зависят от осадков. Предложение варьируется каждый год в зависимости от количества осадков или наличия запасов воды. Спрос также меняется и во многих случаях имеет положительную динамику из-за роста населения, экономического развития и других факторов. Очень часто экономические последствия засух оцениваются исключительно степенью их влияния

на урожай, однако интенсивные и масштабные засушливые условия способны не только ухудшить состояние экономики страны, но и привести к значительным социальным последствиям, приобретающим характер гуманитарной катастрофы в странах и регионах со слабой экономикой.

Кроме рассмотренных типов засух, в контексте оценки воздействия и последствий засухи выделяют еще один тип – экологическую засуху. Поскольку засуха является частью природных процессов на Земле, растения, животные и экосистемы развиваются и адаптируются с учетом данного природного явления. Когда экосистемы выходят за пределы своей способности адаптироваться, они могут преодолевать пороговые значения уязвимости, что приводит к временному либо постоянному изменению их состава, структуры и функционирования в локальном или ландшафтном масштабе. Уязвимость природных систем для засухи зависит от чувствительности системы и ее способности адаптироваться и восстанавливаться после засухи. Экологическая засуха – это «эпизодический дефицит воды, вызывающий в экосистемах превышение пороговых значений уязвимости, оказывающий влияние на самообслуживание экосистемы и запускающий обратную связь в естественных и (или) антропогенных системах»⁴ [13, р. 2544]. При-
мерами воздействия засухи на экологические системы могут являться:

- снижение роста растений в течение сезона или их гибель;
- сокращение либо исчезновение местных видов;
- переходы на ландшафтном уровне (например, преобразование лесов в нелесную растительность, которое может снизить удержание воды в почве, а также изменение режима стока, повышение температуры и ухудшение качества воды в пресноводных экосистемах, нередко приводящие к гибели рыбы, уменьшению возможностей для отдыха и снижению выработки гидроэлектроэнергии).

Экологическая засуха может быть вызвана природными явлениями, такими как отсутствие осадков или повышение температуры воздуха, и в ряде случаев приводит к возникновению многочисленных конкурирующих потребностей в существующих ограниченных источниках воды либо осложняет уже имеющуюся проблему. Так, решения по землепользованию и распределению водных ресурсов могут вызвать или усугубить экологическую засуху, например, за счет модификации гидрологических процессов в целях накопления и хранения воды в период засухи, что в некоторой степени уменьшает доступность воды для экосистем.

Роль атмосферных процессов в возникновении и эволюции засух

Большинство исследований, посвященных изучению засух, показывают, что их возникновение и развитие обусловлены совокупностью причин и природных процессов, которые в течение определенного периода действуют однонаправленно и создают дефицит влаги на фоне высоких температур. Однако основную роль в формировании условий, приводящих к отсутствию осадков в конкретном регионе, обычно играет циркуляционный фактор [14; 15].

Для возникновения засухи в Восточной Европе должны произойти процессы, препятствующие возникновению атлантических воздушных масс вглубь континента. Непосредственно наступление засухи связано с установлением арктических антициклонов, сформировавшихся в холодном и сухом воздухе северных широт. Дальнейшее развитие засухи и ее интенсивность во многом зависят от того, нарушен ли зональный поток в атмосфере и будет ли он преобразовываться в блокирующий процесс («блок»). В большинстве случаев продолжительная интенсивная засуха возникает в результате блокирования зонального потока в атмосфере обширным антициклоном, влияние которого обычно распространяется не только на район стационарирования антициклона, но и на прилегающие территории [3; 16].

Сильные и продолжительные засухи в Восточной Европе обусловлены установлением меридионального переноса в атмосфере и формированием стационарных антициклонов над северными, северо-западными либо центральными районами европейской части России, Нижним Поволжьем или Южным Уралом. Реже стационарные антициклоны возникают над Карпатами или представляют собой ядра высокого давления в системе Азорского антициклона [4]. Кроме того, климатические исследования показывают, что регион Восточной Европы относится к одному из районов наиболее частого появления блокирующих процессов в Северном полушарии [17], таким образом, формирование засух соответствует климатическим условиям данного региона.

Помимо блокирующих процессов, к засушливым явлениям могут приводить другие синоптические процессы, характеризующиеся преобладанием антициклонических полей. Так, в формировании упоминавшейся выше засухи в Украине осенью 2011 г. большую роль сыграла частая повторяемость подвижных транзитных антициклонов, которые смещались из разных районов в условиях слабозамкнутого зонального потока. Устойчивый блокирующий процесс возник лишь в ноябре 2011 г., усилив проявления «динамической» засухи.

⁴Здесь и далее перевод наш. – Е. С.

Немаловажную роль в формировании засух вегетационного периода играют синоптические процессы предшествующего холодного сезона. Для Восточной Европы характерна циклоническая активность в зимний период: циклоны образуются на ветвях полярного фронта и смещаются из районов Северной Атлантики и Средиземного моря по разным траекториям [18]. Для центральных и южных районов региона, в том числе для территории Беларуси и Украины, особую значимость имеет повторяемость южных циклонов, образующихся на средиземноморском участке полярного фронта, поскольку с ними связано выпадение основного количества осадков зимнего периода, формирующих влагозапасы почвы. Уменьшение повторяемости этих циклонов зимой приводит к резкому увеличению вероятности засух в последующий весенне-летний сезон [19].

Еще одним атмосферным процессом, который может наблюдаться одновременно с засухой и усиливать ее проявления, выступает суховей [3]. Данное явление характерно для периферийных областей стационарных антициклонов, но иногда может возникать и в других синоптических ситуациях, при которых отмечаются повышенные градиенты давления и интенсивный перенос воздуха. Горячий и сухой ветер приводит к усилению испаряемости и иссушению почвы, нанося дополнительный ущерб уже угнетенным засухой сельскохозяйственным растениям, что может вызвать их быструю гибель. В целом количество дней с суховеем значительно возрастает в те сезоны, когда наблюдается метеорологическая или сельскохозяйственная засуха, что обусловлено преобладанием устойчивых обширных антициклонов, на периферии которых есть условия для выноса теплых и сухих воздушных масс из субтропических районов [20]. Поскольку суховей сопровождается резким увеличением эвапотранспирации за счет высокой температуры воздуха при повышенной скорости ветра, его появление и устойчивость во времени могут быть связаны с таким процессом, как флеш-засуха (*flash drought*). Понятие флеш-засухи появилось сравнительно недавно, оно характеризует процесс быстрого наступления и усиления засухи [21]. В отличие от медленно развивающейся засухи, которая вызвана уменьшением количества осадков, флеш-засуха возникает, когда недостаточное количество осадков сопровождается аномально высокими температурами (например, волнами тепла) и сильными ветрами при высоком уровне инсоляции. Этот тип засух характерен для теплого сезона года (согласно исследованиям, проведенным в США). Наибольшая интенсивность флеш-засух приходится на май и в дальнейшем снижается в течение вегетационного периода. В качестве индикаторов раннего предупреждения о развитии флеш-засухи рекомендуется использовать такие параметры, как эвапотранспирация и скорость ее изменения, а также влажность почвы.

Индикаторы и индексы засух

Отсутствие универсального определения засухи и характера ее развития, отличающегося относительно медленным нарастанием неблагоприятных условий, приводит к несвоевременной разработке политики в отношении засухи и мер по обеспечению готовности к ней. В 2013 г. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и Глобальное водное партнерство запустили Комплексную программу борьбы с засухой (*Integrated Drought Management Programme, IDMP*)⁵ в рамках Глобальной системы климатического обслуживания (*Global Framework for Climate Services, GFCS*)⁶ для приоритетных сфер уменьшения риска стихийных бедствий – водоснабжения, сельского хозяйства и продовольственной безопасности [8]. Цели этой программы подчеркивают важность региональных и национальных усилий по совершенствованию политики в отношении засухи и инструментов ее прогнозирования. Анализ современных способов адаптации к засухе и обеспечения готовности к ней показал, что в национальной политике необходимо предпринять ряд целенаправленных шагов, одним из которых является «подготовка/написание основных положений национальной политики по борьбе с засухой и планов обеспечения готовности к ней, включая следующие элементы: мониторинг, заблаговременное предупреждение и прогноз; оценку риска и воздействия; смягчение последствий и реагирование» [22, р. 17].

Засуха характеризуется интенсивностью, продолжительностью, площадью охвата и сроками возникновения. Мониторинг засухи предполагает наблюдение за индикаторами и индексами, оценивающими изменения гидрологического цикла региона. Индикаторы применяются для описания условий засухи и включают в себя количество осадков, температуру, речной сток, уровень грунтовых вод, уровень водохранилищ, влажность почвы и снежный покров. Индексы – это численные параметры, которые рассчитываются с использованием климатических и (или) текущих гидрометеорологических данных и дают представление об интенсивности засухи. Они основываются на количественных измерениях, например, осадков и температуры воздуха, которые соответствуют интенсивности, продолжительности, месту и времени возникновения засухи. Индексы имеют важное значение для мониторинга и прогнозирования

⁵Integrated drought management programme : website. 2023. URL: <https://www.droughtmanagement.info/> (date of access: 22.07.2024).

⁶Global framework for climate services : website. 2024. URL: <https://gfcs.wmo.int/ru/node/20864> (date of access: 22.07.2024).

последствий засухи, а также могут служить историческим ориентиром, который планировщики используют для оценки будущих засух [5]. В рамках Комплексной программы борьбы с засухой определены три основных метода мониторинга засухи в целях ее оценки и раннего предупреждения:

- 1) использование одного индикатора или индекса;
- 2) использование нескольких индикаторов или индексов;
- 3) использование комплексных, или гибридных, индикаторов.

Исторически из-за ограниченности данных и времени для проведения исследований мониторинг засухи осуществлялся с использованием одного или нескольких индикаторов. В последнее время стали применяться гибридные индикаторы, представляющие собой комбинации разных индексов. Комплексные индикаторы являются более надежными методами обнаружения засухи, потому что в таком случае интенсивность засухи оценивается с использованием различных данных о доступности воды в конкретном регионе [5].

В настоящее время известно более 100 индикаторов и индексов засух, процедуры расчета которых постоянно совершенствуются и модифицируются. Кроме того, появляются новые индексы [23].

В отечественной агрометеорологии наиболее популярным и широко применяемым является гидро-термический коэффициент Селянинова (ГТК) [3], который представляет собой отношение суммарного количества осадков (R , мм) за какой-либо период к сумме среднесуточных температур воздуха, превышающих 10°C (t , $^\circ\text{C}$), за тот же период:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum R}{0,1 \sum t}. \quad (1)$$

Как видно из формулы (1), расчет ГТК ограничен вегетационным периодом. Кроме того, к недостаткам ГТК относится отсутствие учета весенних запасов влаги в почве, а также использование в качестве показателя испаряемости только температуры воздуха. Засушливым считается период, когда $\text{ГТК} < 1,0$, а сухим – период, когда $\text{ГТК} < 0,5$. Критерии ГТК для определения интенсивности атмосферных засух могут варьироваться для разных агроклиматических зон.

Менее популярным, хотя и физически обоснованным, является общий индекс засушливости Педя (S_i) [24], который рассчитывается с использованием аномалий температуры (T), количества осадков (R) и влагозапасов почвы (W), нормированных на их среднеквадратические отклонения (σ_T , σ_R и σ_W соответственно) за определенный месяц:

$$S_i = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R} - \frac{\Delta W}{\sigma_W}. \quad (2)$$

Засушливым считается состояние, когда $S_i > 0$, а засуха наступает, когда $S_i \geq 2,0$. Отрицательные значения данного индекса характеризуют влажные периоды. Формула (2) дает информацию об общей атмосферно-почвенной засушливости в определенном районе. Исследования показали, что основной вклад в значение индекса S_i вносит атмосферная засушливость, поэтому формулу (2) можно разбить на две формулы, которые отдельно определяют атмосферную засушливость S_a (связана с T и R) и почвенную засушливость S_n (связана с W).

В международной практике одним из наиболее распространенных показателей для оценки засушливых условий на длительных интервалах времени стал индекс Палмера (*Palmer drought severity index*, PDSI) [25]. Для его вычисления используется упрощенное уравнение водного баланса, основными параметрами которого являются данные о температуре воздуха и количестве осадков, а также постоянные параметры, характеризующие влагоемкость почвы. Достоинством расчетной схемы индекса PDSI считается определение потенциальной эвапотранспирации, которая в оригинальной работе У. Палмера вычисляется методом Торнтвейта. Индекс PDSI был разработан для территории США, поэтому выделенные 11 градаций для интерпретации его значений характерны прежде всего для центральных штатов, для других районов индекс PDSI нуждается в адаптации к региональным условиям, что считается одним из существенных недостатков данного индекса.

В настоящее время большой популярностью пользуются сравнительно новые стандартизированные индексы засух, такие как стандартизированный индекс осадков (*standardised precipitation index*, SPI) и стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации (*standardised precipitation evapotranspiration index*, SPEI) [23]. Индекс SPI, рекомендованный ВМО для мониторинга засух в национальных метеослужбах [26], основывается на использовании временных рядов месячных сумм осадков, а его расчет предполагает анализ функции распределения количества осадков на выбранном временном интервале и определение вероятности превышения любого наблюдаемого значения количества осадков. Положительные значения индекса SPI соответствуют разной степени увлажненности, отрицательные – засушливым условиям, при этом значение $\text{SPI} < -2$ характеризует экстремальную засуху. Индекс SPI

может рассчитываться на любых временных интервалах (от месяца и более), что дает возможность отслеживать с его помощью различные типы засух – от метеорологических и сельскохозяйственных, период развития которых составляет 1–6 мес., до гидрологических засух, развивающихся на протяжении 6–12 мес. и более.

Индекс SPEI, предложенный в работе [27], аналогичен индексу SPI, однако его расчет основан на двумерном распределении, причем вместо данных об осадках используется разность месячных сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации. Такой подход позволяет учесть вклад температуры воздуха, что является немаловажным фактором при усилении засушливости в условиях потепления климата и делает этот индекс более эффективным в определении засухи по сравнению с индексом SPI.

Бурное развитие космических технологий в последние десятилетия привело к появлению многочисленных видов данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), часть которых могут успешно применяться для оценки засушливых условий. В их число входят так называемые вегетационные индексы, характеризующие состояние растительности в зависимости от ее спектральной отражающей способности [9; 23]. Как правило, используется красная зона электромагнитного спектра (0,62–0,75 мкм), на которую приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а также ближняя инфракрасная зона (0,75–1,30 мкм), где наблюдается максимальное отражение солнечной энергии внутренней (клеточной) структурой листа. Следует отметить, что все вегетационные индексы так или иначе зависят от состояния атмосферы и подстилающей поверхности, а также характеристик сенсора спутника, поэтому их использование может потребовать проведения предварительной интерпретации с привлечением данных наземных наблюдений.

Наиболее известный и широко применяемый вегетационный индекс – нормализованный разностный вегетационный индекс (*normalised difference vegetation index*, NDVI) – рассчитывается как разность измеренных значений интенсивности отраженного излучения в красном и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах, нормированная на сумму этих величин [23]. Для растительности индекс NDVI принимает значения от 0,2 до 0,8, при этом чем больше зеленая фитомасса, тем больше значение индекса. Таким образом, данный индекс позволяет выявлять стресс растительности, связанный с засухой. Как правило, индекс NDVI рассчитывается за восьми- или десятидневный период в целях уменьшения погрешностей из-за облачности, при этом он имеет очень высокое разрешение и большой пространственный охват. Кроме того, благодаря наличию достаточного ряда наблюдений, включающего значения индекса NDVI, стали возможны расчет и использование аномалий этого индекса, которые являются более показательными для оценки состояния растительного покрова и степени его повреждения засухой (рис. 1).



Рис. 1. Пример распределения аномалий индекса NDVI по территории Европы 9–16 июня 2020 г.
Источник: <https://glam1.gsfc.nasa.gov/>

Fig. 1. An example of the distribution of NDVI index anomalies across Europe on 9–16 June 2020.
Source: <https://glam1.gsfc.nasa.gov/>

В целях повышения эффективности индекса NDVI для выявления засух на его основе были разработаны вегетационные индексы, которые в большей степени характеризуют воздействие засухи на растительность и могут давать информацию о начале, продолжительности и интенсивности засухи путем

фиксации изменений в растительном покрове и их сравнения с многолетними значениями [23]. К таким индексам прежде всего относится индекс вегетационных условий (*vegetation condition index*, VCI), который представляет собой разность текущего значения индекса NDVI и его минимального многолетнего значения за тот же период, нормированную на разность максимального и минимального многолетних значений индекса NDVI за рассматриваемый период [28]. Использование многолетних значений в расчете индекса VCI позволяет учесть вариации состояния растительности, связанные с текущими погодными условиями. Индекс VCI представляется в процентах, при этом состояние засухи идентифицируется, когда значение индекса VCI падает до 35 % и ниже. Данный индекс хорошо отражает условия метеорологической засухи, но для обслуживания сельского хозяйства необходимы более точные показатели, связывающие засушливые условия с состоянием растительности, поэтому на базе индекса VCI и индекса температурных условий (*temperature condition index*, TCI) был разработан составной индекс здоровья растительности (*vegetation health index*, VHI), который описывает интенсивность засухи на основе состояния растительности и влияния на него температуры [29]. Индекс TCI рассчитывается аналогично индексу VCI, но вместо индекса NDVI используется текущая температура в ее сравнении с многолетними максимумом и минимумом. Данный индекс применяется для определения стресса растительности, вызванного реакцией растений на изменение температуры. Индекс VHI также измеряется в процентах, при этом низкие значения индекса VHI соответствуют угнетенному или ослабленному состоянию растительности и повышенным температурам, приводящим к стрессу растительности, что в течение более длительного периода будет свидетельствовать о засухе (рис. 2).

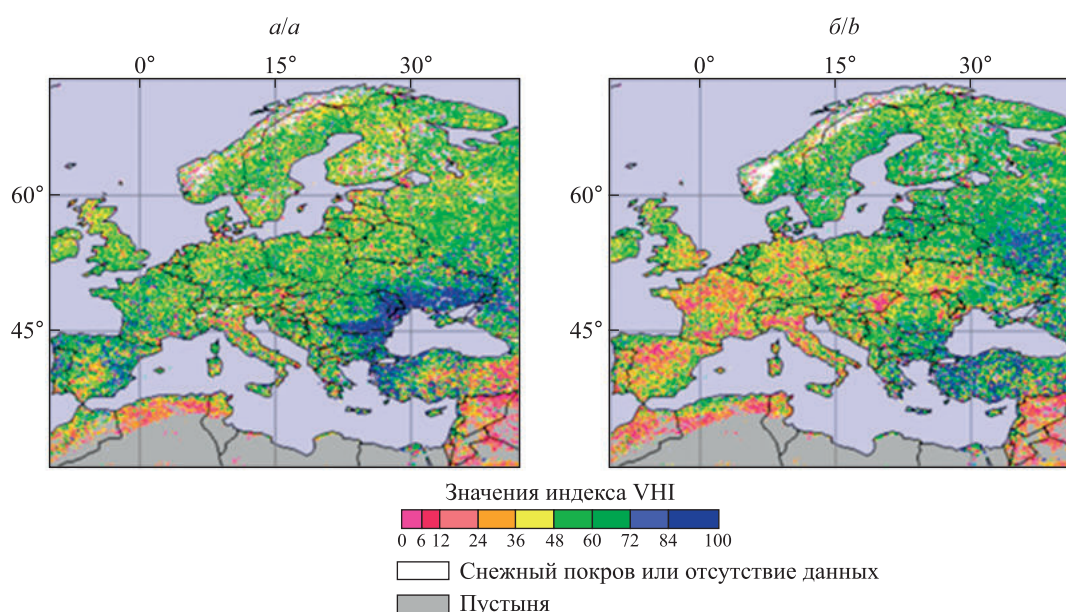


Рис. 2. Пример распределения значений индекса VHI по территории Европы в третью декаду июня 2021 г. (а) и 2022 г. (б).
Источник: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/>

Fig. 2. An example of the distribution of the VHI index values across Europe in the third decade of June 2021 (a) and 2022 (b).
Source: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/>

Как указывалось выше, для оценки засух могут использоваться комплексные индикаторы, которые сочетают в себе параметры, полученные как с помощью наземных наблюдений, так и с помощью спутникового зондирования. Такие индикаторы, как правило, становятся основой систем мониторинга засух.

Эффективные системы мониторинга засух должны предупреждать о приближении засухи на основании анализа погодных тенденций в сравнении с климатическими условиями и выявлять вероятность возникновения засухи, ее интенсивность и последствия. Надежная информация должна своевременно доходить до управляющих водными и земельными ресурсами, политиков и общественности через соответствующие каналы связи. При эффективном использовании эта информация может помочь снизить уязвимость и улучшить возможности смягчения последствий и реагирования для людей и систем, подвергающихся риску [8].

Как показывает мировая практика, системы мониторинга засух могут быть основаны на комбинации различных параметров, полученных только одним способом наблюдения и оптимизированных для кон-

кретной территории. Система мониторинга засух в США (*United States drought monitor*) базируется на индексах, рассчитанных по данным наземных наблюдений либо смоделированных с учетом наземных измерений на станциях. Региональная система мониторинга засухи (*Drought monitoring system*) в Юго-Западной Азии основана преимущественно на спутниковой информации [30]. Данная система базируется на анализе интегрированного индекса суровости засухи (*integrated drought severity index*, IDSI), расчеты которого объединяют спутниковые наблюдения за состоянием растительности и климатические данные, а также другую биофизическую информацию, такую как информация о растительном покрове, типе землепользования, топографии и характеристиках речного бассейна.

В Европе функционирует Европейская обсерватория засухи (*European Drought Observatory*, EDO), в которой в качестве базового параметра выбран комбинированный индикатор засухи (*combined drought indicator*, CDI), объединяющий индексы, полученные как с помощью наземных наблюдений, так и с помощью спутникового зондирования⁷. В индексе CDI информация комбинируется на основе индекса SPI (учет измеренных осадков), аномалий влажности почвы (смоделированные значения) и доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (*fraction of absorbed photosynthetically active radiation*, FAPAR) (получена по данным спутниковых измерений), что позволяет использовать данный индекс для мониторинга прежде всего сельскохозяйственных засух.

Мониторинг и прогноз засух в Беларуси

Несмотря на то что Беларусь расположена в зоне достаточного увлажнения, пространственно-временная неравномерность распределения атмосферных осадков по ее территории обуславливает наличие засушливых периодов различной продолжительности. Засуха в республике может возникать ежегодно, в любое время с апреля по сентябрь⁸.

Согласно СТБ 17.10.01-01-2012⁹ в Беларуси приняты следующие понятия засух: засуха атмосферная – это состояние атмосферы, характеризующееся недостаточным выпадением осадков, высокой температурой и пониженной влажностью, приводящее к возникновению почвенной засухи; засуха почвенная – это иссушение почвы, влекущее за собой недостаточную обеспеченность растений водой.

Засушливые условия на территории республики чаще всего наблюдаются на востоке Минской области, а также в Могилёвской и Гомельской областях. Вторым по засушливости регионом является Гродненская область, за исключением восточных районов [6]. Наибольшая повторяемость крупномасштабных засух на территории Беларуси наблюдается при увеличении повторяемости восточной формы циркуляции, иногда – меридиональной и западной форм циркуляции по типизации Вангенгейма. Это связано с большой генерализацией особенностей общей циркуляции по типизации Вангенгейма. Менее генерализованные типизации (индексации) общей циркуляции атмосферы, например индексация Вительса, демонстрируют меньшую неопределенность при анализе циркуляционной обусловленности засух на территории Беларуси.

В Республиканском центре по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (далее – Белгидромет) учету засух, возникающих на территории страны, уделяется значительное внимание. Составляются каталоги засух за многолетний период, включающие дату начала и окончания засух, их продолжительность в днях, а также район возникновения, некоторые метеорологические параметры в период засух и ущерб, нанесенный засушливыми условиями различным секторам экономики. Ежегодно выпускаются обзоры опасных явлений погоды на территории Беларуси, содержащие в том числе сведения о засухах (при их наличии). Проводится анализ синоптических процессов, обусловивших возникновение засухи, выявляются районы с наибольшим риском развития и распространения засух, повторяемость засух, что позволяет различным отраслям экономики, в первую очередь сельскому хозяйству, планировать проведение работы по минимизации потерь и ущерба от засух [7].

Для оценки засушливых явлений и определения их повторяемости по регионам Беларуси используются различные количественные критерии, учитывающие такие параметры, как максимальная температура воздуха, количество осадков, влажность воздуха и почвы, бездождевые периоды, число дней с относительной влажностью воздуха $\leq 30\%$ и др. [31], полученные на основе многолетних данных государственного кадастра по климату.

⁷Combined drought indicator (CDI) v4.0 // European Drought Observatory : website. 2023. URL: <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000> (date of access: 25.11.2023).

⁸Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси... 58 с.

⁹Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Термины и определения. СТБ 17.10.01-01-2012. Минск : Госстандарт, 2012. 84 с.

Согласно критерию, принятому в Беларуси, период относится к засушливому, если $ГТК \leq 0,7$. На основании полученных данных анализируется пространственно-временное распределение засушливых условий за многолетний период, результаты публикуются в агроклиматических и климатических справочниках [32].

К бездождевым на территории Беларуси относят периоды, когда в течение не менее 10 дней подряд суточные суммы осадков не превышают 1 мм [33]. Непрерывная продолжительность бездождевых периодов составляет 14–18 дней с небольшим увеличением к югу [32], но в отдельные годы значительно превышает средние многолетние значения. На территории республики бездождевые периоды продолжительностью более 20 дней наблюдаются около семи раз за десятилетие, а бездождевые периоды продолжительностью более 30 дней – до двух раз за десятилетие.

Методика оценки почвенных засух в Белгидромете заключается в использовании в качестве критерия условия, согласно которому запасы продуктивной влаги пахотного слоя (0–20 см) составляют не более 10 мм за декаду хотя бы на одном наблюдательном пункте области. За период потепления (1989–2018) повторяемость почвенных засух на территории Беларуси значительно выросла, особенно в южных регионах страны, что отчасти связано с повышенным температурным режимом и легкими по механическому составу почвами [32; 34; 35].

Информация о повторяемости (в %) почвенных засух (запасы продуктивной влаги пахотного слоя составляют 10 мм и менее) в течение декады, месяца, сезона размещается в агроклиматических справочниках и используется для оценки условий произрастания различных сельскохозяйственных культур [31].

Кроме того, для оценки засушливости используется число дней с относительной влажностью воздуха ≤ 30 %. Если относительная влажность опускается до 30 % и ниже, то такие дни относят к сухим, что соответствует засушливым условиям [7; 31].

В агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства, проводимом Белгидрометом, основное внимание уделяется предоставлению оперативной информации о влиянии складывающихся погодных условий, особенно экстремальных, на состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур. При этом большое значение имеют данные мониторинга засух, так как именно это опасное природное явление часто вызывает недобор урожая. Однако отдельные из перечисленных выше критериев не всегда дают объективную оценку и поэтому не могут применяться в оперативной работе.

Такие количественные критерии, как ГТК, бездождевые периоды, запасы продуктивной влаги в почве и др., в основном используются при проведении исследований для оценки засух и расчета их повторяемости на территории Беларуси в целом на основании данных многолетних наблюдений. Для анализа фактической информации о наблюдаемых опасных гидрометеорологических явлениях и прогнозной информации об ожидаемых опасных гидрометеорологических явлениях, включая засуху, в оперативной работе отечественных гидрометеорологов используются критерии, приведенные в постановлении Совета Министров Республики Беларусь от 23 января 2007 г. № 75¹⁰. Согласно данному постановлению, засуха атмосферная – это отсутствие эффективных осадков (более 5 мм в сутки) за период не менее 30 дней подряд во время вегетации сельскохозяйственных культур при максимальной температуре воздуха выше $+25$ °C не менее чем в половине дней вышеуказанного периода; засуха почвенная – это запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см, составляющие не более 10 мм на протяжении не менее трех декад подряд в вегетационный период.

За начало засухи на территории Беларуси принимается период, когда по указанным выше критериям засуха отмечается хотя бы в одной области и занимает более 30 % ее площади [31]. Эти критерии используются для текущей оценки условий произрастания и формирования урожайности сельскохозяйственных культур, а сведения о начале и развитии засух на территории страны приводятся в различных агрометеорологических справках, докладах, бюллетенях и доводятся до государственных органов и сельскохозяйственных организаций.

В Белгидромете с 2006 г. используется автоматизированная оперативная система декадной оценки засух (АОСОЗ), адаптированная к условиям Беларуси (рис. 3). Основой данной системы является комплексирование (объединение) показателей атмосферной и почвенной засух [31]:

- 1) гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК);
- 2) показателя увлажнения Шашко (Md);
- 3) показателя влагообеспеченности Процорова (V , %);
- 4) числа дней с относительной влажностью воздуха ≤ 30 % (N_0);
- 5) числа дней с максимальной температурой воздуха ≥ 30 °C (N_T);

¹⁰О реализации Закона Республики Беларусь «О гидрометеорологической деятельности»: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23 янв. 2007 г. № 75 [Электронный ресурс]. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/blr81408.pdf> (дата обращения: 01.08.2023).

6) запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см под озимыми, ранними яровыми и поздними яровыми сельскохозяйственными культурами (W_{0-20} , мм);

7) запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см под озимыми, ранними яровыми и поздними яровыми сельскохозяйственными культурами (W_{0-50} , мм);

8) запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см под озимыми, ранними яровыми и поздними яровыми сельскохозяйственными культурами (W_{0-100} , мм).

На основании значений этих показателей засухи дифференцируются на следующие категории по интенсивности¹¹: очень сильная засуха, сильная засуха, средняя засуха, слабая засуха и отсутствие засухи (табл. 1).

Комплексирование (объединение) показателей атмосферной и почвенной засух обеспечивает расчет комплексного показателя интенсивности засухи (рис. 4).

Использование данной автоматизированной системы позволяет оперативно определять начало засухи и ее интенсивность, что существенно улучшает агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики.

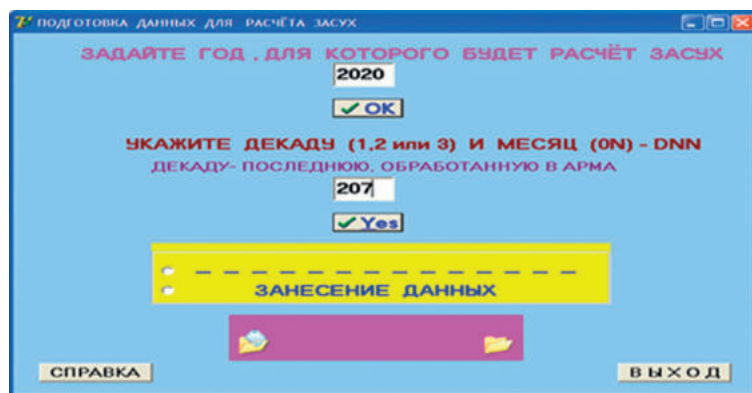


Рис. 3. Программный комплекс
«Автоматизированная оперативная система декадной оценки засух»

Fig. 3. The software package
«Automated operational drought assessment system»

Таблица 1

Критерии (граничные значения показателей) дифференциации засух на категории (классы) по интенсивности

Table 1

Criteria (boundary values of indicators) of differentiation of droughts into categories (classes) by intensity

Показатели оценки засух	Категории засух по интенсивности				
	Очень сильная засуха (класс 1)	Сильная засуха (класс 2)	Средняя засуха (класс 3)	Слабая засуха (класс 4)	Отсутствие засухи (класс 5)
ГТК	0–0,19	0,20–0,39	0,40–0,60	0,61–0,75	0,76–5,00
Md	0–0,09	0,10–0,19	0,20–0,30	0,31–0,40	0,41–3,00
V , %	0–40	41–50	51–60	61–70	71–100
N_0	8–11	6–7	3–5	1–2	0
N_T	8–11	6–7	3–4	1–2	0
W_{0-20} , мм	0–5	6–10	11–15	16–20	21–70
W_{0-50} , мм	0–15	16–25	26–35	36–45	46–140
W_{0-100} , мм	0–25	26–40	41–60	61–80	81–280

Источник: [31].

¹¹Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Термины и определения. СТБ 17.10.01-01-2012. Минск : Госстандарт, 2012. 84 с.

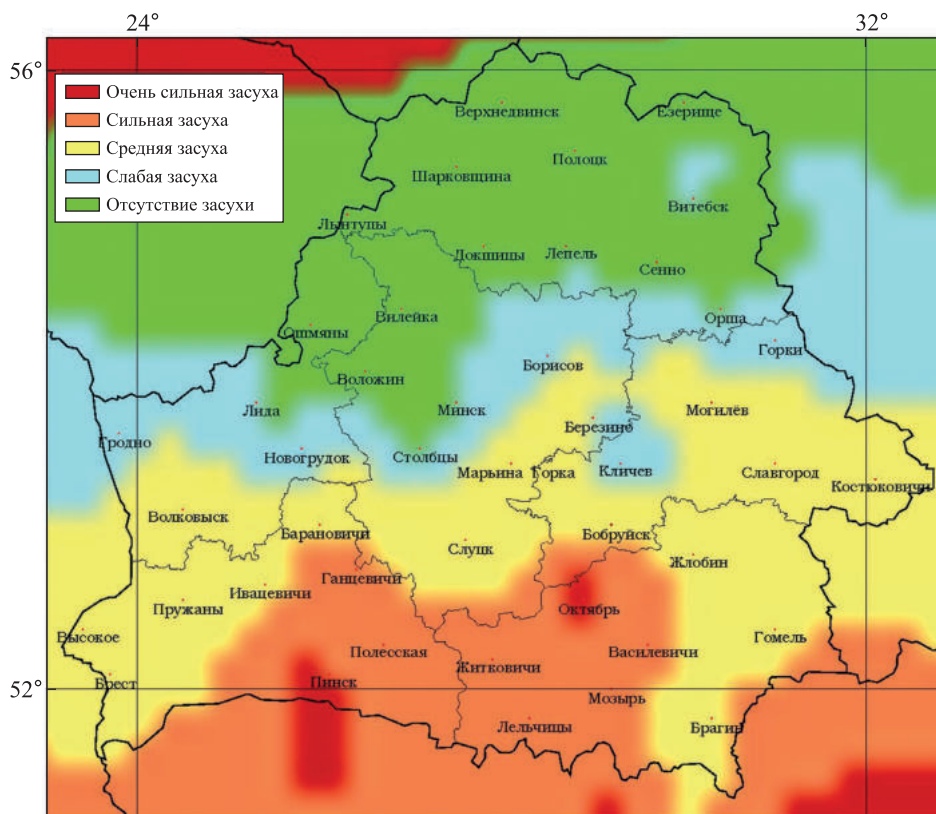


Рис. 4. Пример распределения комплексного показателя интенсивности засухи на территории Беларуси 1 сентября 2024 г.

Fig. 4. An example of the distribution of a complex indicator of drought intensity in Belarus on 1 September 2024

Обслуживание сельского хозяйства имеет определенные особенности, связанные с контролем больших территорий, занимаемых сельскохозяйственными угодьями. Из-за недостаточного количества наземных пунктов оперативного мониторинга, а также в силу разного рода естественных процессов, при которых происходит постоянное изменение границ посевных площадей, характеристик грунтов и условий вегетации на различных полях, часто не хватает объективной оперативной информации, необходимой для оценки текущей ситуации и прогнозирования ее дальнейшего развития¹². Используя спутниковые данные, можно контролировать сроки и качество проведения основных агротехнических работ и тем самым оптимизировать управление сельскохозяйственным производством. Систематическое поступление снимков позволяет осуществлять наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности.

В отделе агрометеорологии службы гидрологии и агрометеорологии Белгидромета с 2015 г. для агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства страны широко используется спутниковая информация. Установлено программное обеспечение для прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных ДЗЗ (ПО «Прогноз»), разработанное научно-инженерным республиканским унитарным предприятием «Геоинформационные системы» НАН Беларуси. В 2020 г. в ходе выполнения работ в рамках государственной программы «Научные технологии и техника» на 2016–2020 гг. ПО «Прогноз» было усовершенствовано путем добавления данных ДЗЗ с космических аппаратов «Aqua», «Suomi NPP», «NOAA-20», «MetOp», «Fengyun-3» и внедрено в эксплуатацию как программный комплекс «Прогноз ЗК».

Оперативная оценка состояния посевов зерновых культур с помощью программного комплекса «Прогноз ЗК» проводится подекадно с апреля по июль. Оценить состояние посевов можно различными способами: по суммарному индексу NDVI (от начала вегетации до текущего периода включительно), по отношению индекса NDVI к среднему многолетнему значению либо к индексу NDVI за предыдущую декаду или за аналогичный период любого выбранного из базы года (как правило, сравнение проводится с благоприятным или предыдущим годом) (рис. 5).

¹²Семенова І. Г. Супутниковий моніторинг в метеорології та агрометеорології : навч. посіб. [Електронний ресурс]. Одеса : Одеський держ. екол. ун-т, 2023. 165 с. URL: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32895.69284> (дата зверту: 21.03.2024).

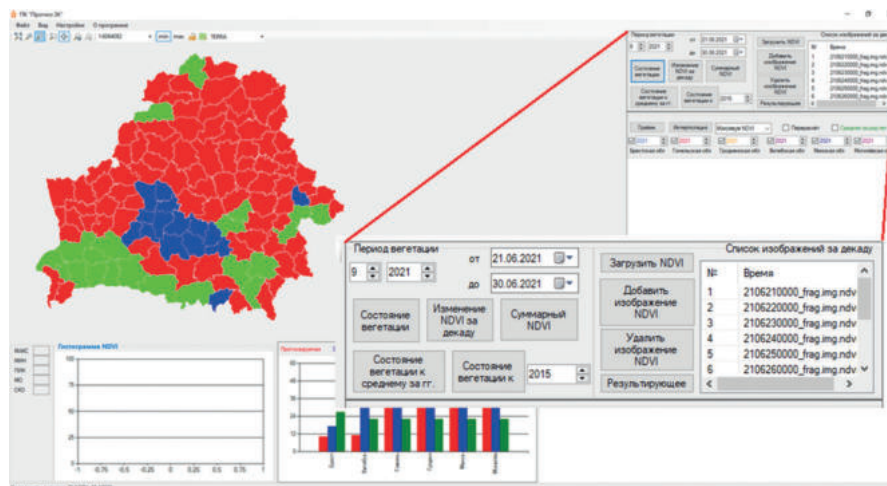


Рис. 5. Пример оценки состояния посевов по индексу NDVI

Fig. 5. An example of an assessment of the condition of crops according to the NDVI index

Основной функцией программного комплекса «Прогноз ЗК» является получение прогнозной информации об урожайности зерновых культур (рис. 6). Урожайность рассчитывается каждую декаду (начиная с первой декады мая) в разрезе областей и административных районов для всех зерновых культур в целом на основе оперативного анализа вегетационного развития растительности с использованием расчета коэффициентов корреляции зависимости урожайности от характеристик гистограммы NDVI, построения графиков зависимости. Пространственно-временное распределение индекса NDVI позволяет анализировать динамику развития растительного покрова, внутригодовую изменчивость, сезонные и фенологические изменения, особенно на ранних стадиях вегетационного периода, а также определить время окончания вегетационного периода, рассчитать и оценить продуктивность сельскохозяйственных культур.

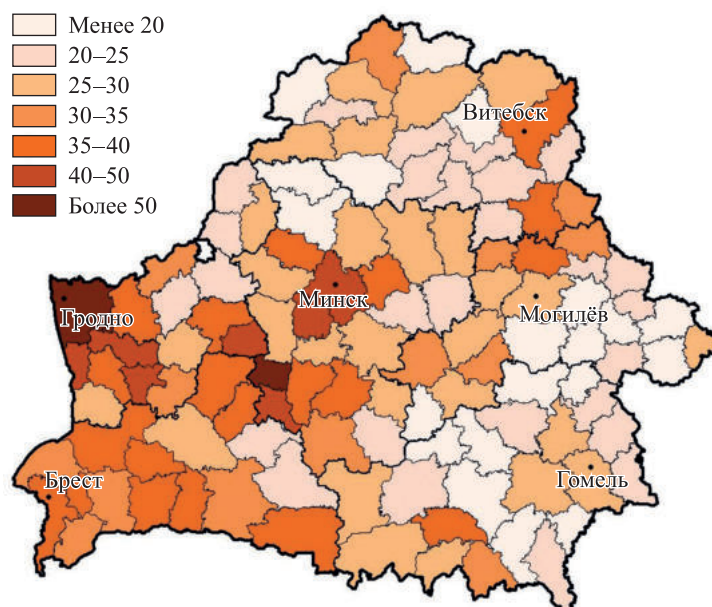


Рис. 6. Пример прогноза урожайности с использованием программного комплекса «Прогноз ЗК»

Fig. 6. An example of a yield forecast using the software package «Prognoz ZK»

На современном этапе применения программного комплекса расчет прогнозной информации производится на основе данных, полученных со спутника «Тетра». Данные, полученные с остальных спутников («Aqua», «Suomi NPP», «NOAA-20», «MetOp», «Fengyun-3»), накапливаются в базе (т. е. сохраняются обработанные изображения NDVI), так как для корректного расчета прогнозной информации необходимо наличие данных не менее чем за 5 лет.

Полученные расчеты урожайности зерновых культур в разрезе областей и административных районов в дальнейшем анализируются специалистами отдела агрометеорологии и сопоставляются с результатами других имеющихся методик, после чего выпускается доклад «Прогнозная информация об урожайности и валовом сборе зерновых и зернобобовых культур в Республике Беларусь».

Заключение

Приведенный обзор современных методов исследования и оценки засух показывает, что предсказание возникновения и эволюции данного комплексного гидрометеорологического явления, как и его мониторинг и определение в целом, представляет собой актуальную и многогранную задачу, которая, несмотря на многочисленные исследования, остается нерешенной и в некоторых регионах приобретает приоритетное значение на фоне наблюдающихся изменений климата. Дальнейшие исследования в этой области должны сосредоточиться на повышении эффективности применения различных показателей оценки засух и их комбинаций, а также на разработке критериев, соответствующих уровням интенсивности засухи, для обнаружения и раннего предупреждения засух.

Библиографические ссылки

1. Naumann G, Cammalleri C, Mentaschi L, Feyen L. Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*. 2021;11:485–491. DOI: 10.1038/s41558-021-01044-3.
2. Jaagus J, Aasa A, Aniskevich S, Boincean B, Bojari R, Briede A, et al. Long-term changes in drought indices in Eastern and Central Europe. *International Journal of Climatology*. 2022;42(1):225–249. DOI: 10.1002/joc.7241.
3. Бучинский ИЕ. *Засухи и суховеи*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1976. 214 с.
4. Семенова ИГ. *Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні*. Харків: ФОП Панов А. М.; 2017. 236 с.
5. Semenova I. Some meteorological aspects of severe agricultural drought in the Northern Black Sea region in 2019–2020. *Environmental Sciences Proceedings*. 2021;8(1):18. DOI: 10.3390/ecas2021-10299.
6. Логинов ВФ, Сачок ГИ, Микущкий ВС, Мельник ВИ, Коляда ВВ. *Изменения климата Беларуси и их последствия*. Логинов ВФ, редактор. Минск: Тонпик; 2003. 330 с.
7. Блетько ВА, Мельчакова НВ. Засухи в Беларуси. *Родная природа*. 2019;8:16–18.
8. Семёнова ИГ. Методические аспекты мониторинга засух в Украине. В: Лопух ПС, Гледко ЮА, Курлович ДМ, Логинова ЕВ, Матюшевская ЕВ, редакторы. *Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Материалы Международной научно-практической очно-заочной конференции, посвященной 100-летию Белорусского государственного университета, 60-летию кафедры физической географии и образовательных технологий, 100-летию со дня рождения профессора О. Ф. Якушко; 24–26 марта 2021 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2021. с. 208–212.
9. Хлебникова ЕИ, Павлова ТВ, Сперанская НА. Засухи. В: Ананичева МД, Анохин ЮА, Асарин АЕ, Асмус ВВ, Болгов МВ, Борисова ОК и др. *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. Семенов СМ, редактор. Москва: Росгидромет; 2012. с. 126–164.
10. Логинов ВФ, Неушкин АИ, Рочева ЭВ. *Засухи, их возможные причины и предпосылки предсказания*. Обнинск: Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных; 1976. 72 с.
11. Cherenkova EA, Kononova NK, Muratova NR. Summer drought 2010 in the European Russia. *Geography, Environment, Sustainability*. 2013;6(1):55–66. DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-1-81-92.
12. Семёнова ИГ. Метеорологические и синоптические условия засухи в Украине осенью 2011 г. *Український гідрометеорологічний журнал* [Интернет]. 2012 [протитировано 11 ноября 2020 г.];10:58–64. Доступно по: <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2012/06/9.pdf>.
13. Crausbay SD, Ramirez AR, Carter SL, Cross MS, Hall KR, Bathke DJ, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017;98(12):2543–2550. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0292.1.
14. Давитая ФФ. Засухи в СССР и научное обоснование мер борьбы с ними по природным зонам. В: Всесоюзная ордена Ленина академия сельскохозяйственных наук имени В. И. Ленина. *Вопросы земледелия и борьбы с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР. Материалы выездной сессии ВАСХНИЛ; 7–14 октября 1958 г.; Саратов, СССР. Том 1*. Саратов: Саратовское книжное издательство; 1959. с. 54–58.
15. Danilovich IS, Gledko YuA, Tarasevich IV. Drought frequency in Belarus in connection with atmospheric circulation in the Euro-Atlantic sector. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2023;48(9):778–785. DOI: 10.3103/S1068373923090054.
16. Черенкова ЕА, Кононова НК. Связь опасных атмосферных засух в Европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2009;1:73–82. EDN: JVYJFB.
17. Wiedenmann JM, Lupo AR, Mokhov II, Tikhonova EA. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: block intensity as a diagnostic. *Journal of Climate*. 2002;15(23):3459–3473. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<3459:TCO-BAF>2.0.CO;2.
18. Сумак ЕН, Семёнова ИГ. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;2:79–93. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.
19. Semenova I, Sumak K. Cyclonic activity in cold season over territories of Belarus and Ukraine and its relation to the warm season droughts. *Croatian Meteorological Journal* [Internet]. 2017 [cited 2023 July 20];52:59–73. Available from: <https://hrac.srce.hr/201613>.
20. Semenova I, Slizhe M. Synoptic conditions of droughts and dry winds in the Black Sea Steppe province under recent decades. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:69. DOI: 10.3389/feart.2020.00069.

21. Otkin JA, Svoboda M, Hunt ED, Ford TW, Anderson MC, Hain C, et al. Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2018;99(5):911–919. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0149.1.
22. World Meteorological Organization, Global Water Partnership, Wilhite DA. *National drought management policy guidelines: a template for action* [Internet]. Geneva: World Meteorological Organization; 2014 [cited 2020 October 22]. IV, 40 p. (Integrated drought management tools and guidelines series; 1); (WMO; No. 1164). Available from: https://www.droughtmanagement.info/literature/IDMP_NDMPG_en.pdf. Co-published by the Global Water Partnership.
23. Всемирная метеорологическая организация, Глобальное водное партнерство, Свобода М, Фукс БА. *Справочник по показателям и индексам засушливости* [Интернет]. Женева: [б. и.]; 2016 [проектировано 22 октября 2022 г.]. IV, 53 с. (Средства и руководящие указания по комплексной борьбе с засухой; 2); (ВМО; № 1173). Доступно по: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices_ru_2016.pdf.
24. Педь ДА. О показателе засухи и избыточного увлажнения. *Труды Гидрометцентра СССР*. 1975;156:19–38.
25. Palmer WC. *Meteorological drought. Research paper No. 45*. Washington: U. S. Government Printing Office; 1965. VI, 58 p.
26. Всемирная метеорологическая организация. *Руководство для пользователей стандартизированного индекса осадков* [Интернет]. Женева: Всемирная метеорологическая организация; 2012 [проектировано 9 октября 2020 г.]. 20 с. (ВМО; № 1090). Доступно по: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_ru_2012.pdf.
27. Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010;23(7):1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
28. Kogan FN. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995;15(11):91–100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
29. Kogan F, Adamenko T, Kulbida M. Satellite-based crop production monitoring in Ukraine and regional food security. In: Kogan F, Powell AM Jr, Fedorov O, editors. *Use of satellite and in-situ data to improve sustainability. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on using satellite data and in-situ data to improve sustainability; 2009 June 9–12; Kyiv, Ukraine*. Dordrecht: Springer; 2011. p. 99–104 (NATO science for peace and security. Series C, Environmental security). DOI: 10.1007/978-90-481-9618-0_11.
30. Thenkabail PS, Gamage MSDN, Smakhtin VU. *The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in southwest Asia*. Colombo: International Water Management Institute; 2004. V, 26 p. Report No.: 85.
31. Мельник ВИ, Мельчакова НВ. Предложения по совершенствованию системы оценки засух в Республике Беларусь. *Экологический вестник*. 2014;4:78–83. EDN: UFMUVQ.
32. Данилович ИС, Мельник ВИ, редакторы. *Научно-прикладной справочник по агроклиматическим ресурсам Республики Беларусь на основе оценки современного изменения климата за 1989–2018 гг.* Минск: Белгидромет; 2020. 331 с.
33. Гольберг МА, Волобуева ГВ, Фалей АА. *Опасные явления погоды и урожай*. Минск: Ураджай; 1988. 120 с.
34. Мельник ВИ, Буяков ИВ, Пискунович НГ, Шумская ТГ. Оценка влагозапасов и повторяемости почвенных засух на территории Белорусского Полесья в период современного потепления климата. *Природные ресурсы*. 2020;2:104–114. EDN: QUMOGA.
35. Мельник ВИ, Пискунович НГ, Буяков ИВ, Яцухно ВМ, Шумская ТГ. Пространственно-временные изменения почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата. *Природные ресурсы*. 2021;1:15–21. EDN: SGPZYB.

Получена 11.12.2023 / исправлена 19.09.2024 / принята 19.09.2024.
Received 11.12.2023 / revised 19.09.2024 / accepted 19.09.2024.