

## **ГЛАВА 9. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МЕЛИОРАТИВНОГО КОМПЛЕКСА**

### **9.1. Разработка программного обеспечения для мелиоративного комплекса (Гавриловская Н.В., Гаспарян И.Н., Дубенок Н.Н., Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., Ивашова О.Н., Михеев П.А., Палиивец М.С., Петухова М.В., Подобный А.В., Снежко В.Л., Солошенко А.Д., Шабанов В.В., Щедрина Е.В.)**

Продовольственная безопасность России это составляющая национальной безопасности государства. Аграрное производство на 90% пахотных земель ведется в сложных природно-климатических условиях. Потенциал высокопродуктивных сортов сельскохозяйственных культур и интенсивных аграрных технологий не реализуется в засушливые и избыточно влажные годы. Важность кратного увеличения объемов мелиорации была еще раз подчеркнута на регулярном совещании в апреле 2022 года президентом Российской Федерации Владимиром Владимировичем Путиным.

Развитие мелиорации в России можно охарактеризовать несколькими этапами. До тридцатых годов прошлого века применялись исторически сложившиеся методы: самотечное и лиманное орошение, полив затоплением и т.д. Управление водораспределением не внедрялось, была слабо развита научная и нормативная база отрасли. В период 1930-1940 гг. стали внедряться средства механизации, началось строительство регулирующих и водомерных сооружений, на строительство мелиоративных систем разрабатывались проекты. С 1990 года в мелиоративной отрасли начали внедряться системы автоматизированного управления, в проектной деятельности широко использоваться системы автоматизированного проектирования. Делаются первые шаги в области оборудования мелиоративной средствами телемеханики.

В настоящее время наступил период цифровой мелиорации. Цифровизация мелиоративных процессов в первую очередь должна

базироваться на обеспечении безопасной мелиорации. Безопасная мелиорация – одно из условий перехода к органическому сельскому хозяйству. Что понимается под безопасностью мелиорации? Это проектирование, строительство и эксплуатация объектов мелиоративного комплекса с применением ресурсосберегающих технологий, с учетом сохранения почвенного плодородия, предотвращения негативных геологических и гидрологических процессов, защиты водных ресурсов и аквакультуры.

В будущем умные мелиорируемые поля будут входить в состав интеллектуальных мелиоративных систем. Умные мелиорируемые поля используют цифровизацию технологий сбора и анализа больших данных, характеризующих текущие процессы природной среды и условий роста растений с целью создания оптимального мелиоративного режима. При проектировании, строительстве и эксплуатации мелиоративных систем необходимо использовать мощный инструментарий цифровизации, искусственного интеллекта, автоматизации и роботизации, только тогда мелиоративные системы можно считать интеллектуальными.

Потенциал мелиорируемых земель значительно выше фактических показателей. Продуктивность сельскохозяйственных угодий может быть увеличена техническим совершенствованием мелиоративных систем и предотвращением деградации их земель. В рамках внедрения цифровых технологий в мелиоративном комплексе коллективом института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева разработаны средства автоматизации гидротехнических сооружений и созданы программных комплексов для их расчета.

Орошение и осушение 9,5 миллионов гектар сельхозугодий в Российской Федерации обеспечивается сетью каналов длиной более 20 тысяч километров, на водных объектах установлено 13 тысяч гидротехнических сооружений, более 7 тысяч дождевальных машин и установок подают воду на поля. Материалом исследований стали новые мелиоративные гидротехнические

сооружения и массивы данных по состоянию мелиорируемых земель. Методы исследований – системный анализ и синтез.

Для информационного обеспечения задач планирования и управления была разработана уникальная база данных, объединившая многолетние сведения о площадях и структуре сельхозугодий, состоянии мелиорируемых земель и техническом уровне мелиоративных систем в каждом из субъектов Российской Федерации [137]. Для всех субъектов Российской Федерации база содержит данные:

- площади сельскохозяйственных угодий (пашня, залежь, сенокосы, пастбища, многолетние насаждения);
- площадь мелиорируемых сельскохозяйственных угодий (орошаемые, осушенные);
- данные о мелиоративном состоянии земель (орошаемых и осушенных);
- сведения о площадях деградированных земель в пределах мелиоративных систем
- сведения о техническом состоянии мелиоративных систем

Каналы – это артерии мелиоративной системы, от которых зависит ее жизнь. Разработанная программа гидравлического расчета обеспечивает точность при проектировании и оперативный прогноз при эксплуатации каналов [123]. Позволяет производить расчет облицованных и необлицованных каналов различного профиля, выполняет проверку скоростного режима в зависимости от типа грунтов / вида крепления, определяет параметры канала, необходимые для получения конкретных гидравлических характеристик. Программа может выполнять прогноз гидравлических характеристик (в случаях, когда изменяются объем притока, состав или фракция наносов это особенно важно).

Автоматизация предотвращает непроизводительные сбросы из каналов при снижении водопотребления, в том числе при отключении дождевальных машин. На больших орошаемых массивах экономически невыгодно

подключать к источнику энергии каждое сетевое гидротехническое сооружение. Разработанный автоматический регулятор не имеет аналогов и легко совместим с дюкером или трубчатым переездом. Регулятор энергонезависим, так как использует эффект инжекции, применяемый до сих пор только в отсасывающих трубах гидротурбин и водоструйных насосах. В рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» был выигран грант на реализацию инновационного проекта по дальнейшей модернизации этого сооружения.

Разработанная компьютерная программа позволяет определить параметры инжекционного регулятора для установки на конкретном канале [33]. Программа удостоена золотой медали на 25 международном салоне изобретений и инновационных технологий. Заключен лицензионный договор на ее использование.

Чем меньше линейный размер рыбы, тем ниже критическая скорость, при которой она не может сопротивляться течению. Поэтому мальки гибнут, попадая в водозаборные сооружения. Это отрицательно сказывается на численности особей и экологическом состоянии русла. Предлагаемая модернизация не только повысит надежность, но и сделает водопропускные или водозаборные сооружения на оросительных каналах еще и рыбозащитными [27, 28, 29].

С безотказной работой водосброса связана безопасность пропуска паводка через плотину водохранилищного гидроузла. Шахтные конструкции наиболее уязвимы в работе из-за кавитации. Для ее устранения нами предложен ряд конструктивных решений шахтных водосбросов [25, 26].

Для целей определения эффективности ввода в эксплуатацию неиспользуемых мелиоративных земель была создана серия баз данных «Подекадных продуктивностей зерновых культур на почвах различных механических составов по агрогидрологическим районам областей Российской Федерации» [107]. Базы содержат следующие структурированные данные: многолетние запасы продуктивной влаги (мм) в почве на конец декады под

яровыми зерновыми культурами (далее – влагозапасы) средние по агрогидрологическим районам; влагозапасы в % от полной продуктивной влагоемкости; влагозапасы для лет 25% и 75% обеспеченностей; влагозапасы в % от полной продуктивной влагоемкости для лет 25% и 75% обеспеченностей; продуктивность яровых зерновых культур на почвах глинистых и суглинистых механических составов; продуктивность яровых зерновых культур на почвах глинистых и суглинистых механических составов для лет 25% и 75% обеспеченностей; среднемноголетнюю продуктивность яровых зерновых культур по агрогидрологическим районам; среднемноголетнюю продуктивность яровых зерновых культур по агрогидрологическим районам для лет 25% и 75% обеспеченностей.

Базы данных предназначены для оценки эффективности размещения сельскохозяйственных культур на различных территориях, целесообразности проведения мелиоративных мероприятий различной направленности (орошение и осушение) в течение периода вегетации, эффективности инвестиций в сельскохозяйственную деятельность на данных землях. База данных позволяет хранить следующие структурированные данные: многолетние запасы продуктивной влаги в почве на конец декады под яровыми зерновыми культурами, влагозапасы в % от полной продуктивной влагоемкости, продуктивность яровых зерновых культур на почвах глинистых и суглинистых механических составов и др. База данных представляет интерес для специалистов сельского хозяйства, научных сотрудников, предприятий АПК, а также банков и страховых компаний.

Структура баз данных описана ниже согласно [176]. Схема расположения агрогидрологических районов по катене приведена на рисунке 9.1.

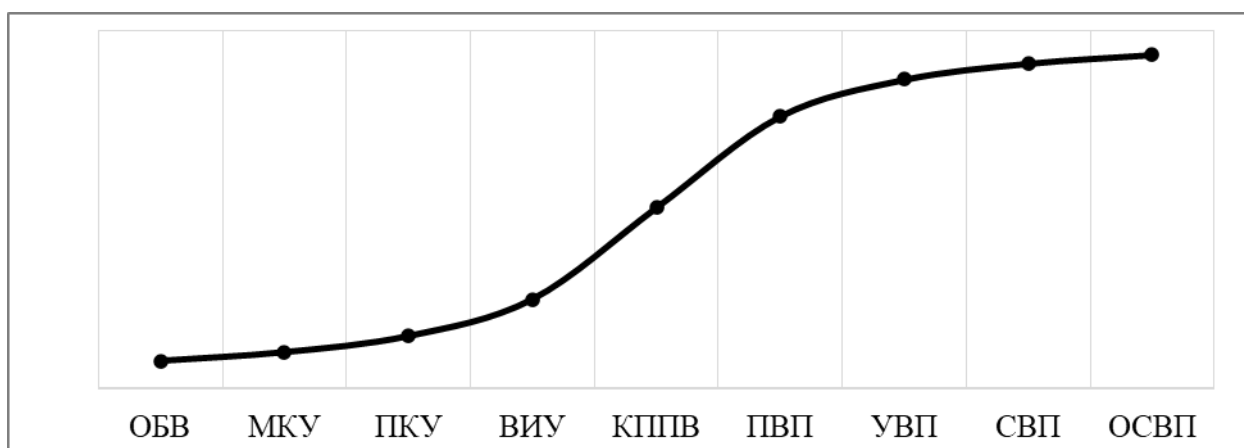


Рисунок 9.1 – Схема расположения агрогидрологических районов по катене

В Таблице 9.1 указано соответствие агрогидрологических районов ландшафтным элементам.

Таблица 9.1

### Соответствие агрогидрологических районов ландшафтным элементам

ОБВ	Грунтовый тип водного питания, нижний элемент ландшафта. Пойменные или супераквальные фации.
МКУ	Грунтовый тип водного питания, нижний элемент ландшафта. Пойменные или супераквальные фации.
ПКУ	Грунтово-склоновый тип водного питания, нижний элемент ландшафта. Супераквальные фации.
ВИУ	При нулевом уклоне - атмосферный тип водного питания, иначе - склоновый, средние элементы ландшафта. Трансаккумулятивные фации.
КППВ	При нулевом уклоне - атмосферный тип водного питания, иначе - склоновый, средние элементы ландшафта. Трансаккумулятивные или трансэлювиальные фации.
ПВП	При нулевом уклоне - атмосферный тип водного питания, иначе - склоновый, средние элементы ландшафта. Трансаккумулятивные или трансэлювиальные фации.
УВП	Атмосферный тип водного питания, верхние элементы ландшафта. Элювиальные или аккумулятивно-элювиальные фации.
СВП	Атмосферный тип водного питания, верхние элементы ландшафта. Элювиальные или аккумулятивно-элювиальные фации.
ОСВП	Атмосферный тип водного питания, верхние элементы ландшафта. Элювиальные или аккумулятивно-элювиальные фации.

Столбец 1 «Элемент рельефа (АГР)» Указаны аббревиатуры названий агрогидрологических районов, тип водного питания и фация.

ОБВ - Тип обводнения присущ болотным, полуболотным, глеевым подзолистым, серым лесным почвам и буроземам глеевым различного

механического состава, преимущественно легкого. Грунтовые воды почти всегда присутствуют на той или иной глубине в корнеобитаемом слое почвы и влияние капиллярной каймы на увлажнение метрового слоя велико. (Грунтовый тип водного питания)

МКУ – Тип максимального капиллярного увлажнения характеризуется почти непрерывным в течение года влиянием капиллярной каймы на увлажнение нижнего полуметрового слоя дерново-глеевых, сильно подзолистых почв и подзолов, аллювиальных лесных и серых лесных оглеенных почв. (Грунтовый тип водного питания).

ПКУ – Тип периодического капиллярного увлажнения формируется на дерново – карбонатно – выщелоченных, дерново – палево – подзолистых, аллювиально-луговых, дерново-средне - и слабоподзолистых почвах различного механического состава, но преимущественно легкого, подстилаемого глинами и суглинками. Термин «периодическое увлажнение» означает, что влияние грунтовых вод на запасы влаги корнеобитаемого слоя почвы наблюдается в отдельные периоды, например, весной, ранним летом или осенью. (Грунтово-склоновый тип водного питания).

ВИУ - Тип временно-избыточного увлажнения характерен для дерновосредне- и слабоподзолистых, серых лесных, аллювиальных и др. почв различного механического состава. Избыток влаги наблюдается в результате временного ее накопления на слабо дренированных почвах или на участках, расположенных в низинах с сезонным переувлажнением. В отдельные годы возможно влияние грунтовых вод на корнеобитаемый слой, так как в среднем многолетнем периоде грунтовые воды залегают здесь на глубине более 3 м. Нередко, при наличии водоупорного слоя в виде плиточной глины или цементированного песка, наблюдается образование верховодки. (При нулевом уклоне - атмосферный тип водного питания, иначе - склоновый).

КППВ - Тип увлажнения капиллярно-подвешенной и капиллярно-подперто-подвешенной влагой формируется на серых лесных почвах, черноземах оподзоленных и выщелоченных, подстилаемых лёссовидными

глинами и суглинками в районах Вольно-Подольской, Среднерусской, Предуральской возвышенностей, а также на горных серо-коричневых, черноземах выщелоченных, горно-лесных перегнойно-карбонатных и др.;

ПВП - Тип полного весеннего промачивания формируется на серых лесных почвах, черноземах выщелоченных и др., на лёссовидных суглинках с проникновением талых вод на глубину более 2-3 м. (Атмосферный тип водного питания).

УВП - Тип умеренного весеннего промачивания характерен только для почв с непромывным водным режимом при весеннем промачивании до глубины 1,5-2,0 м. К ним относятся тяжелосуглинистые черноземы и другие почвы полусасушливой зоны, подстилаемые лёссовидными суглинками. (Атмосферный тип водного питания).

СВП - Тип формируется в условиях непромывного водного режима почв при неглубоком их промачивании весной (глубина промачивания не более 1,0-1,2 м, а в отдельные годы не более 70 см). (Атмосферный тип водного питания)

ОСВП - Тип очень слабого весеннего промачивания характерен для черноземов типичных, обыкновенных, карбонатных и южных, средне- и тяжелосуглинистого механического состава на лёссовидных суглинках и глинах. Атмосферный тип водного питания.

Столбец 5 «Влагозапасы, мм (W) в слое 0...100 см» Указаны значения содержания многолетних запасов продуктивной влаги (мм) в почве на конец декады под культурой, средние по агрогидрологическим районам;

Столбец 2...4 Указано время в декадах и по месяцам. В столбцах 2...3 используется подекадная временная шкала.

Столбец 6 «Влагозапасы в долях от ПВ (W/ПВ) в слое 0-100 см» Указаны значения содержания продуктивной влаги в почве в долях от полной продуктивной влагоемкости ( $W_{ПВ}^*$ ). Принято, что  $W_{ПВ}^* = 316$  мм. Полная продуктивная влагоемкость – это максимально возможное содержание в единице объема почвы запасов продуктивной влаги. Рассчитывается по формуле:



$$W_{ПВ}^* = W_{ПВ} - W_{ВЗ} \quad (9.1)$$

где:  $W_{ПВ}$  – полная влагоемкость,  $W_{ВЗ}$  – влажность завядания.

Значения влагозапасов в долях рассчитываются по формуле:

$$W_{i\%} = W_i / W_{ПВ}^* \quad (9.2)$$

где:  $W_i$  – значение продуктивной влаги в почве на текущую декаду;  $W_{ПВ}^*$  – полная продуктивная влагоемкость.

Столбец 7 «W оптимальная (в долях от ПВ)» Указана оптимальная влажность для культуры в долях от Полной продуктивной влагоемкости

Столбец 8 «Продуктивность (S)\*» Указана продуктивность в долях от единицы.

Продуктивность рассчитана по формуле В.В. Шабанова:

$$S = \left( \frac{W_i}{W_{опт}} \right)^{\gamma W_{опт}} \cdot \left( \frac{1 - W_i}{1 - W_{опт}} \right)^{\gamma(1 - W_{опт})} \quad (9.3)$$

где:  $W_i$  – значение продуктивной влаги в почве (в % от  $W_{ПВ}^*$ );  $W_{опт}$  – оптимальное значение продуктивной влаги для данной культуры (в % от ПВ);  $\gamma$  – коэффициент саморегулирования растения (уровень адаптации к внешним условиям) постоянный для каждой фазы развития и, характеризующий форму кривой на графике зависимости  $S=f(W)$  [173].

Параметры приведенной выше формулы детализированы в таблице 9.2.

Таблица 9.2

Параметры формулы (9.3)

№ фазы i	$\alpha$	$\gamma$	$W_{опт}$
1	0,15	5,1	0,55
2	0,15	5,5	0,48
3	0,2	5,6	0,54
4	0,35	5,9	0,43
5	0,15	5,3	0,61

где № фазы: 1 - посев – всходы - кущение; 2 - кущение-выход в трубку; 3 - выход в трубку-колошение; 4 – колошение - налив зерна; 5 - налив зерна - восковая спелость;  $\alpha$  - вес фазы в общей продуктивности (по Ю.К. Никольскому, В.В. Шабанову).

Столбец 9 «Средне многолетняя продуктивность по АГР» Указана средне многолетняя продуктивность культуры по агрогидрологическому району (в долях от 1). Средне многолетняя продуктивность рассчитана по формуле:

$$\bar{S}_{\text{АГР}} = \sum(S_i^{\text{АГР}} \cdot \alpha) \quad (9.4)$$

где:  $S_i^{\text{АГР}}$  – декадная продуктивность культуры в рассматриваемом агрогидрологическом районе;  $\alpha$  – коэффициент веса фазы в общей продуктивности культуры для декады.

Столбец 10 «W 25%» и 11 «W 75%» Указаны значения содержания продуктивной влаги в почве в годы 25% (влажный год) и 75% (сухой год) обеспеченности (в мм);

Столбец 12 «W 25% (%)» и 13 «W 75% (%)» Указаны значения содержания продуктивной влаги в почве в годы 25% и 75% обеспеченности в процентах от полной продуктивной влагоемкости. Данные значения рассчитываются так же, как и в столбце 6, исходные данные - столбцы 10 и 11;

Столбец 14 «S 25%» и 15 «S 75%» указаны значения продуктивности в годы 25% и 75% обеспеченности (в долях от 1). Рассчитывается аналогичным образом со столбцом 5, но для соответствующих обеспеченностей;

Столбец 16 «25% Средне многолетняя продуктивность по АГР» и 17 «75% Средне многолетняя продуктивность по АГР» указаны значения средне многолетней продуктивности по агрогидрологическим районам в годы 25% и 75% обеспеченности (в долях от 1) за период вегетации культуры. Рассчитывается аналогичным образом со столбцом 6.

Представленный подход к визуализации относительной продуктивности обладает большим потенциалом при планировании размещения культур и водномелиоративных мероприятий по территории, такие базы дают представление о состоянии посева в разных временных и пространственных диапазонах. Картирование продуктивности позволяет определять места на катене, где размещение культуры будет наиболее выгодно.

Представленные методики по оценке изменения продуктивности при изменении климата и для лет различной обеспеченности позволяют оценить

потенциальную необходимость проведения мелиоративных мероприятий и могут быть использованы при проектировании мелиоративных систем при расчете их обеспеченности. Для агрогидрологических районов Московской области (например, ВИУ – Тип Временно-избыточного увлажнения) наиболее критичными являются засушливые годы, снижение продуктивности в год Р75% обеспеченности может составить 23% по отношению к среднему году.

Базы данных изменения продуктивности яровой пшеницы показывают необходимость понижения влажности корнеобитаемого слоя (осушение) в начале периода вегетации для нижних элементов рельефа, с переходом на орошение к концу периода вегетации для поддержания относительной продуктивности культуры на высоком уровне. Они свидетельствуют о возможности возделывания яровой пшеницы на всех, из рассмотренных элементов рельефа с достижением наивысшей продуктивности, но при проведении необходимых гидромелиоративных мероприятий в течение всего периода вегетации культуры. Зоны наивысшей продуктивности в нерегулируемых условиях перемещаются от засушливых территорий в сторону увлажненных, от нижних элементов рельефа к верхним. Что свидетельствует о необходимости проведения мелиоративных мероприятий, в разной степени, во всех рассмотренных в работе агрогидрологических районах (территориях, дифференцированных по типам увлажнения и водного питания) для достижения наивысших урожаев. Предложенная методика позволяет оценить направленность мелиораций.

Приведенные в базах данные свидетельствуют о необходимости точного мелиоративного регулирования. Таким образом, разработана методика и инструмент обоснования мезомасштабной необходимости проведения мелиорации на землях неиспользуемых мелиоративных систем, расположенных на разных элементах ландшафтной катены.