

Физико-агрономические основы управления продукционным процессом, мелиорацией, рекультивацией и охраной земель

УДК 631.6

СОВРЕМЕННЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ МЕЛИОРАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

И. М. Михайленко

*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии
Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220
E-mail: i.mikhailenko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16 февраля 2012 г., принята к печати 28 марта 2012 г.

Обоснованы основные направления и этапы формирования теоретической базы мелиорации как системно интегрирующей науки об управлении такими сложными системами, какими являются агроландшафты. Для иллюстрации направлений рассмотрен методический пример управления водным режимом агроландшафта.

Ключевые слова: мелиорация, режимное и ресурсное управление, агроландшафты, оптимизация, проектирование, математические модели, водный режим.

ВВЕДЕНИЕ

Принятие Правительством Российской Федерации Программы развития мелиорации сельскохозяйственных земель на период до 2020 года предъясвляет более строгие требования к повышению эффективности современной мелиоративной науки, к ускоренному развитию ее теории. На ее основе станет возможным решать задачи управления мелиоративными системами и принимать оптимальные проектные решения по их развитию. Для обоснования основных направлений развития теории необходимо более строго сформулировать основные цели и задачи мелиорации сельскохозяйственных земель. Они следуют из самого определения мелиорации земель как комплекса мер по улучшению их плодородия. В данном комплексе различают водную или гидротехническую мелиорацию (орошение, осушение, промывка засоленных почв); химическую мелиорацию (известкование, гипсование, окисление); физическую мелиорацию (пескование, глинование, агролесомелиорация) и др. Мелиорация может относиться ко всему ландшафту в целом или какой-либо его части: лугам, водоемам, почвам и др. Для получения устойчивых высоких урожаев мелиорация необходима на всех землях (Аверьянов, Шабанов, 1970; Голованов и др., 1986).

Таким образом, мелиорация сельскохозяйственных земель представляет собой деятельность по оптимизации среды обитания растений, приводящую к улучшению неблагоприятных природных условий с целью наиболее эффективного использования природных ресурсов с учетом ограничений на режимы агроландшафтов с одной стороны, и целенаправленное регулирование почвообразовательных процессов – с другой (Голованов и др., 1986).

С точки зрения современной науки, любое ориентированное на достижение определенной цели воздействие, тем более связанное с оптимизацией параметров среды, является управлением, и на него может распространяться современная теория управления и информационно-технические средства их реализации. При этом все возможные задачи управления необходимо разделить на два основных направления. Первое из них – это режимные задачи управления, как правило, реализуемые в реальном времени на основе актуальной информации о состоянии мелиоративных систем. Для их решения может использоваться современная развитая теория оптимального управления динамическими системами (Моисеев, 1975). Второе – ресурсное, связанное с оптимизацией элементов мелиоративных систем, посредством которого обеспечиваются необходимыми

ресурсами все режимные задачи управления. В отличие от первого направления, ресурсные задачи решаются вне реального времени, из расчета эволюции мелиоративных систем на всем периоде их эксплуатации. Для их решения могут применяться современные методы оптимального проектирования сложных систем (Воронов, 1983).

В соответствии с принятой классификацией к режимным задачам управления могут быть отнесены водная (или гидротехническая) мелиорация и химическая мелиорация. К ресурсным задачам управления может быть отнесена физическая мелиорация, а также агролесомелиорация и проектирование гидротехнических сооружений.

При подобном разделении всех задач управления легче обозначить основные этапы развития общей теории мелиорации. При этом необходимо определить общую цель: развитие теории режимного управления мелиоративными системами должно создать научно-методическую базу для применения современной развитой теории оптимального управления динамическими системами, а развитие теории ресурсного управления, соответственно, – базу для применения современной теории оптимального проектирования сложных систем.

Для построения теории режимного управления мелиоративными системами в соответствии с общей теорией оптимального управления динамическими системами необходимо создать следующую научно-методическую и техническую базу:

1) обосновать достижимые цели режимного управления, учитывающие необходимость получения требуемой продуктивности агроландшафтов и заданные экологические ограничения;

2) формализовать достижимые цели режимного управления и экологические ограничения в критерии оптимизации, используемые для последующей разработки моделей и алгоритмов измерения и управления состоянием мелиоративных систем;

3) разработать динамические модели режимных параметров мелиоративных систем, позволяющих строить оценки и прогнозы выбранных критериев оптимальности режимного управления, учитывающие влия-

ние основных внешних возмущений, включая состояние агроценозов и климатических факторов, а также отражающих чувствительность состояния мелиоративных систем к основным факторам режимного управления;

4) обосновать выбор методов прямого и косвенного измерения состояния мелиоративных систем, включая мобильные средства измерения состояния посевов и почвенной среды, а также средства дистанционного зондирования (радио и оптические);

5) на основании выбранных методов и технических средств измерения состояния мелиоративных систем разработать математические модели измерения;

6) на основании динамических моделей режимных параметров мелиоративных систем и моделей измерения разработать алгоритмы оптимального оценивания состояния мелиоративных систем по информации от разнотипных измерителей, в т.ч. дистанционных;

7) на основании динамических моделей режимных параметров мелиоративных систем и выбранных критериев оптимальности разработать алгоритмы оптимального управления режимами, являющегося задающим по отношению к регуляторам исполнительных технологических машин;

8) разработать математические модели исполнительных технологических машин, реализующих алгоритмы оптимального управления режимами с учетом пространственной неоднородности параметров;

9) на основании алгоритмов оптимального управления режимами и математическими моделями исполнительных технологических машин разработать бортовые регуляторы, работающие по заданиям блоков оптимального управления.

Для построения теории ресурсного управления на базе современной теории оптимального проектирования сложных систем необходимо создать следующую научно-методическую базу:

1. обосновать достижимые цели ресурсного управления, отражающие требования систем режимного управления и учитывающие общесистемные ландшафтные ресурсные ограничения;

2. формализовать достижимые цели ресурсного управления и общесистемные ландшафтные ресурсные ограничения в критерии оптимизации элементов мелиоративных систем и агроландшафтов;

3. разработать специализированные модели проектирования, отражающие влияние элементов мелиоративных систем и агроландшафтов на режимные параметры;

4. разработать алгоритмы оптимального проектирования мелиоративных систем и элементов агроландшафтов, обеспечивающие экстремальные значения выбранным критериям оптимизации.

Таким образом, для создания общей теории режимного управления мелиоративными системами требуется решить девять базовых исследовательских задач, а для развития теории ресурсного управления – только четыре. Но это не означает, что ресурсные задачи управления проще режимных: скорее наоборот, они гораздо сложнее, так как требуют развития принципиально новых направлений исследования, не имеющих аналогов в других отраслях науки. Речь идет о специализированных моделях проектирования, отражающих влияние элементов мелиоративных систем и на режимные параметры агроландшафтов. Данные модели отражают балансы энергии и вещества между всеми элементами агроландшафта, каждый из которых сам по себе является большой системой. Модели, отражающие балансы больших элементов и систем являются макроуровневыми, в отличие от получивших широкое распространение в настоящее время микроуровневых моделей состояния отдельных элементов системы «почва – растения – среда». Несмотря на серьезные достижения в области моделирования состояний, макро-моделирование на сегодня оказалось совершенно не развитым и не сложившимся как самостоятельное направление. Это объясняется тем, что области его возможного применения, в частности, адаптивно-ландшафтное земледелие и большие балансные опыты, требуемые для идентификации макромоделей, сами по себе являются новыми и развивающимися (Пегов, Хомяков, 1991; Шабанов, 1985; Михайленко, Якушев, 2006а, б).

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

1. Задача режимного управления

Данная задача для простоты понимания решается на модельной культуре, а полученные результаты затем могут быть перенесены на другие культуры и технологии. Здесь в качестве модельной культуры взяты многолетние травы, идущие на приготовление грубых волокнистых кормов для молочного скота.

Как уже указано выше, постановка задачи режимного управления начинается с выбора актуальной цели управления, которая для многолетних трав заключается в получении заданного объема биомассы требуемого качества на всех укосах.

Вышеуказанная вербальная цель управления должна быть представлена в формализованном виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N m(T_n) \otimes M^*, \sum_{n=1}^N g_n^p(T_n) \otimes P^*, \\ & \sum_{n=1}^N g_n^u(T_n) \otimes U^*, \sum_{n=1}^N g_n^k(T_n) \otimes K^*, \end{aligned} \quad (1)$$

$$g_n = \frac{m(T_n)}{\sum_{n=1}^N m(T_n)},$$

где M^*, P^*, U^*, K^* – заданные значения биомассы (урожая), сборы протеина, углеводов и клетчатки; $n = 1, 2, \dots, N$ – номера укосов; t, T – суточное время и длительность между-косных интервалов вегетации.

Для решения данной задачи необходимы математические модели, позволяющие получать прогнозы как величины урожая, так и требуемых качественных показателей. Они подробно описаны в работе (Михайленко, Тимошин, 2010; Михайленко и др.) и здесь не представлены. Критерий оптимальности, отвечающий поставленной цели (1), имеет следующий вид:

$$J(T) = \sum_{n=1}^N [Y(T_n) - Y^*]^T G(T_n) [Y(T_n) - Y^*] \quad (2)$$

где $Y^T(T_n) = [M(T_n) \ P(T_n) \ U(T_n) \ K(T_n)]$ – вектор, компонентами которого являются: общая биомасса, масса протеина, углеводов и клетчатки для n -го между-косного интервала вегетации, t – индекс транспонирования вектора;

$$G(T_n) = \begin{matrix} \text{К} \\ \text{К} \\ \text{К} \\ \text{К} \\ \text{Д} \end{matrix} \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ g_2 & 0 & 0 \\ 0 & g_3 & 0 \\ 0 & 0 & g_4 \end{matrix} \begin{matrix} \text{П} \\ \text{Б} \\ \text{Б} \\ \text{Б} \\ \text{Б} \end{matrix} - \text{весовая матрица мас-}$$

совых и качественных составляющих критерия.

Задача управления процессом заключается в поиске минимума критерия (2) по следующим факторам: числу укосов N и длительности межукосных интервалов вегетации T_n , а также уровню подкормок азотными удобрениями между укосами. В тех случаях, когда технология располагает системой полива, то дополнительными факторами управления являются нормы и моменты времени отдельных поливов на соответствующих межукосных периодах вегетации.

Задача режимного управления с учетом состояния посевов имеет ряд особенностей, которые не позволяют решить ее в один прием. Прежде всего, это весьма неблагоприятное сочетание внешних случайных климатических возмущений и большой инерционности процессов, когда допущенные технологические просчеты уже невозможно поправить. Кроме того, неблагоприятно сочетание больших размеров сельскохозяйственных полей и ограниченных ресурсов оперативно-технологического воздействия, что приводит к необходимости реализации подвижного технологического воздействия, осуществляемого технологическими машинами.

Все перечисленные особенности заставляют нас реализовать управление в два основных приема (или этапа). Первый (программный) – когда мы заранее определяем общий расход всех видов ресурсов, необходимых для получения заданного результата и порядок ввода данных ресурсов в технологических операциях. Второй этап – когда мы воплощаем технологии в реальном времени и можем оперативно учитывать фактическое воздействие возмущений и реальное состояние самих посевов.

При этом особенности объекта управления заставляют нас и первый этап управления решать в два приема, когда мы сначала,

считая состояние почвенной среды фактором управления, находим оптимальную программу его изменения, а затем уже определяем параметры технологических операций, в наибольшей степени приближающих состояние почвенной среды к оптимальной программе. Для решения обеих задач программного управления (планирования агротехнологии) мы применяем метод, сочетающий в себе схему динамического программирования и принцип максимума Понтрягина (Моисеев, 1975). В соответствии со схемой динамического программирования задача оптимизации решается от конца к началу и разбивается на ряд последовательных задач, число которых равно числу укосов.

В результате решения первого этапа первой задачи мы получаем наилучшее число укосов N^* , оптимальную программу изменения состояния почвенной среды $U_N^*(t)$ и соответствующую ей программу эволюции состояния травостоя $X_N^*(t)$ по всем укосам, что соответствует общепринятому определению потенциального урожая.

На втором этапе первой задачи мы находим параметры технологических операций. В связи с тем, что даты подкормок тесно связаны с датами проведения укосов, задача оптимизации внесения удобрений сводится к определению только размеров подкормок отдельно в каждом укосе. В том случае, когда используется система полива, одновременно определяются и нормы поливов.

На рис. 1, 2 представлена динамика накопления потенциального урожая и его качественных показателей при заданной урожайности $200 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$, заданном сборе протеина $8 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$, переваримой клетчатки $10 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$ и углеводов $6 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$ для варианта с тремя поливами, совмещаемыми с тремя подкормками (рис. 3). Этот вариант устраняет дефицит азотного питания, исключает перерасход ресурсов и обеспечивает удовлетворительное приближение уровня программируемого урожая к потенциальному уровню. Оптимальные параметры вариантов технологии представлены в таблице.

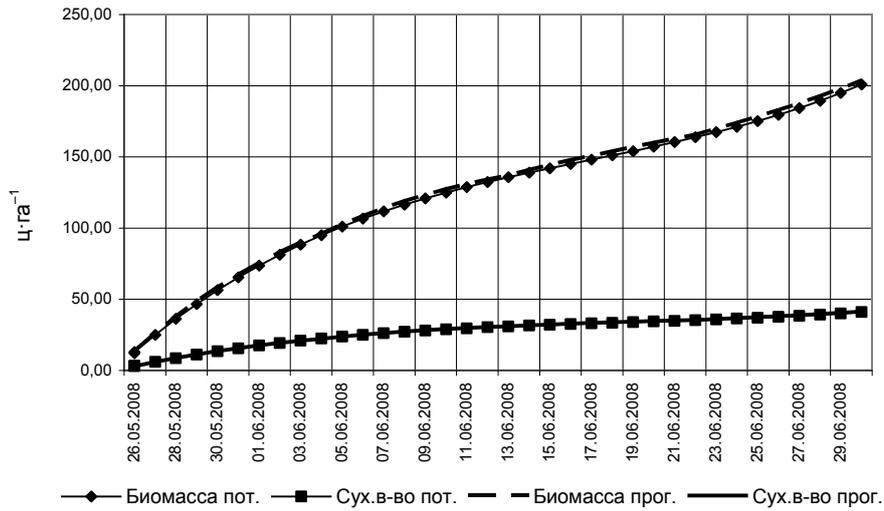


Рис. 1. Динамика вегетации травостоя «потенциального» (пот.) и программируемого (прог.) урожая для варианта технологии с тремя подкормками и тремя поливами

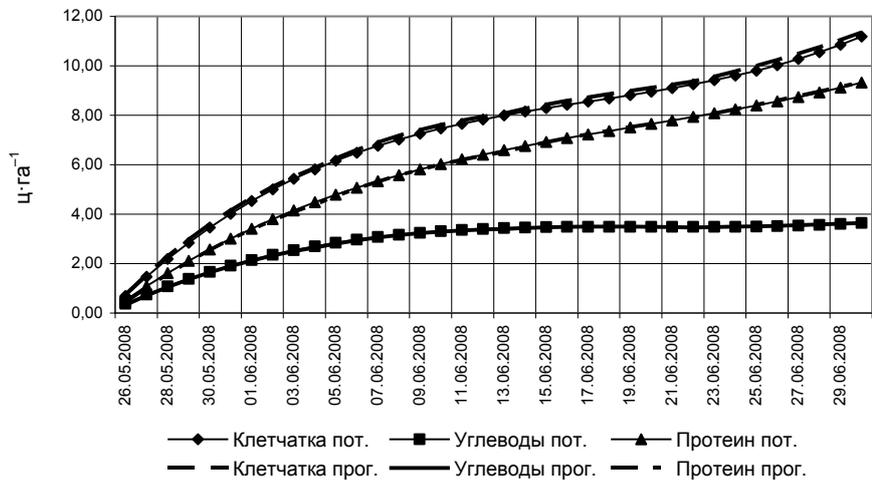


Рис. 2. Динамика качественных показателей травостоя «потенциального» (пот.) и программируемого (прог.) урожая для варианта технологии с тремя подкормками и тремя поливами

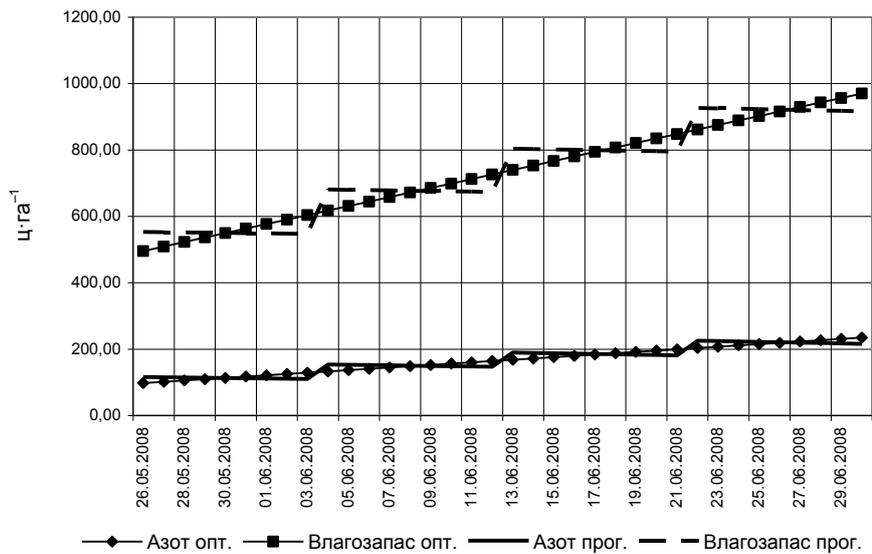


Рис. 3. Требуемая динамика влагозапаса и содержания доступного азота в почве «потенциального» (пот.) и программируемого (прог.) урожая для варианта технологии с тремя подкормками и тремя поливами

Таблица. Оптимальные параметры вариантов технологий

Дата проведения	Подкормки азотом, кг га ⁻¹	Нормы поливов, т га ⁻¹
Вариант 1		
26 мая 2008 г.	82,63	84,4
7 июня 2008 г.	0	172,0
19 июня 2008 г.	0	174,26
Вариант 2		
26 мая 2008 г.	24,84	79,06
7 июня 2008 г.	54,38	177,05
19 июня 2008 г.	57,14	174,29

2. Задача ресурсного управления

На рис. 4 приведен график, иллюстрирующий метод решения задачи. Он заключается в создании условий для накопления количества воды в элементах агроландшафта, достаточного для осуществления поливов. Расход поливной воды представлен наклонной штриховой линией (U) на интервале вегетации, между его началом (T₁) и окончанием (T₂).

Уровень полной полевой влагоемкости почвы выделен пунктирной линией (V). Оче-

видно, что на интервале времени до начала вегетации, в конце интервала вегетации и после него в агроландшафте количество воды, поступающей с осадками, является избыточным, не задерживается в почвенном слое сельскохозяйственного поля и сбрасывается по рельефным складкам в естественные водоемы. Большую часть этой воды можно накопить во вновь сооружаемых искусственных водоемах, расположенных между отдельными полями (рис. 5).

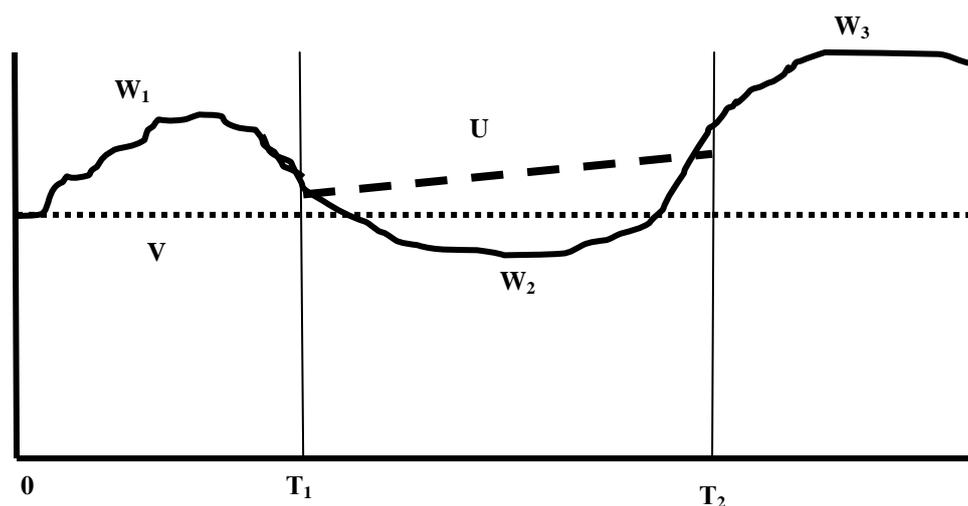


Рис. 4. Динамика годового водного баланса почвы (т·га⁻¹)

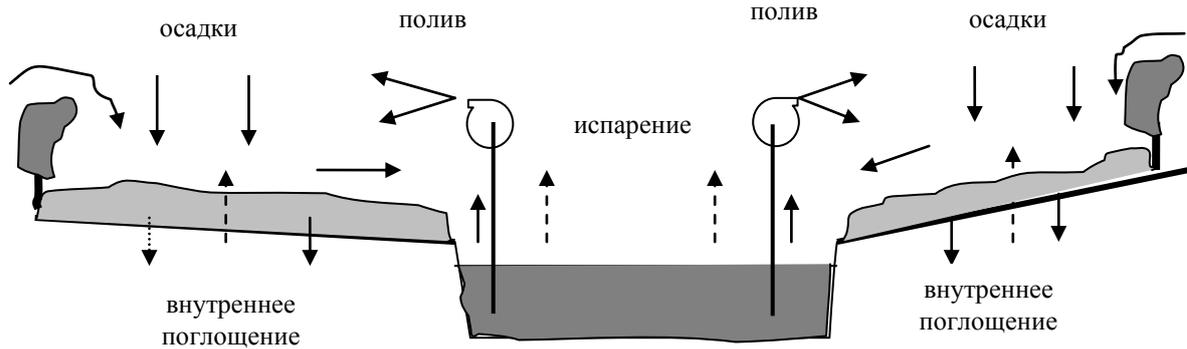


Рис. 5. Схема влагообмена в агроландшафте с искусственным водоемом

Для решения задачи мы использовали специально разработанные модели водного режима агроландшафта, включающего в себя сельскохозяйственное поле, лесополосы и искусственный водоем. Базовой является модель состояния почвенной среды сельскохозяйственного поля, которая в развернутой канонической форме представлена в работе (Михайленко, 2010, 2). Данная модель дополнялась моделью запаса воды в искусственном водоеме:

$$\dot{x}_3 = a_{31}(t)x_3 - b_3U(t) + c_{31}f_1(t) + c_{32}f_2(t) + c_{33}f_3(t) \quad (3)$$

$$x_3(0) = d_2S.$$

где x_3 – измеряемое состояние водоема, характеризующее запас воды (средняя по площади глубина), мм, а также моделями:

– средней высоты снежного покрова от параметров лесополос, длины L и высоты h для метеоданных по снегу $s(t)$:

$$S = p_0 + (p_1L + p_2h^2) \int_0^T s(t) dt \quad (4)$$

– емкости искусственного водоема от его геометрических размеров, длины l и ширины H , или, более правильно, площади зеркала Z

$$V = x_3(lr H), \quad (5)$$

– ограничений на уровень воды в водоеме, обеспечивающий требуемую норму по

$$x_3(T) \in [x_{3\max} - [F_T U(t) dt] / Z]. \quad (6)$$

Целью оптимизации в рассматриваемой задаче является достижение оптимальной влагообеспеченности в течение всего вегета-

ционного периода. Факторами оптимизации могут служить геометрические параметры искусственного водоема и снегозащитных сооружений агроландшафта.

Критерий оптимальности решения задачи, адекватный поставленной цели, имеет следующий вид:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T [x_{ir}^*(U^*(t)) - x_{ir}(t)]^2 dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

где – программа оптимального влагосодержания почвы, полученная из решения задачи управления состоянием посевов на всем интервале вегетации, $U^*(t)$ – оптимальная программа поливов, соответствующая оптимальной программе вегетации.

Отработка методологии и разработанного алгоритма проводилась для следующих исходных данных:

- площадь поля под многолетними травами – 10 га;
- начальное отношение площади зеркала водоема к площади поля – 0,25;
- начальная общая длина лесополос системы снегозадержания – 450 м;
- начальное значение средней высоты насаждений в лесополосе – 3,9 м;
- максимально допустимая глубина водоема – 2,9 м.

Задача решалась для условий достижения следующих показателей:

- общая урожайность культуры на втором укосе (в период максимального дефицита влаги) – 400 ц·га⁻¹;
- качественные показатели: клетчатка – 25 ц·га⁻¹; протеин – 19 ц·га⁻¹; углеводы – 11 ц·га⁻¹.

Достижение подобного водного режима фрагмента агроландшафта возможно при следующих оптимальных параметрах его элементов:

- отношение площади зеркала водоема к площади поля – 0,19;
- общая длина лесополос системы снегозадержания – 511,4 м;
- значение средней высоты насаждений в лесополосе – 4,5 м;
- относительное изменение уровня воды в водоеме – 0,5 м.

Показатель оптимальности решения задачи:

- значение критерия оптимальности (7) для начальных значений параметров – 100,7;
- значение критерия для оптимальных значений параметров – 0,007.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованы основные направления и этапы формирования теоретической базы мелиорации, которые проиллюстрированы методическим примером управления водным

режимом агроландшафта. На их основании можно сделать вывод, что развитие современной теоретической базы мелиорации как системно интегрирующей науки об управлении такими сложными системами, какими являются агроландшафты, не может не опираться на последние достижения агрофизики, информационно-измерительных систем и общей науки об управлении. Подобный подход к развитию теории позволит отказаться от нормативного подхода при формировании управлений мелиоративными системами и проектировании их элементов, а в перспективе перейти к решению прямых задач оптимизации, обеспечивающих получение компромиссных решений, учитывающих необходимость повышения продуктивности агроландшафтов при одновременном сохранении их устойчивости и удовлетворении экологических ограничений. В целом это существенно повысит экономическую и экологическую эффективность мелиоративных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьянов С. Ф., Шабанов В. В. 1970. Общая схема исследований методов мелиораций среды обитания растений. Проблемы мелиорации Полесья. Тезисы докладов научно - технической конференции по мелиорации земель Полесья. Часть 1. Минск.
- Воронов В. В. 1983. Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука.
- Голованов А. И., Балан А. Г., Ермакова В. Е., Ефимов И. Т. 1986. Мелиоративное земледелие. М.: Агропромиздат.
- Михайленко И. М., Тимошин В. Н. 2010. Электронный агроном. Теоретические основы и программно-техническая реализация. Экологические системы и приборы. 7: 21-26.
- Михайленко И. М., Якушев В. П. 2006а. Макромоделирование – методическая основа для оптимизации агроландшафтов. Часть 1. Плодородие. 2(29): 31-34.
- Михайленко И. М., Якушев В. П. 2006б. Макромоделирование – методическая основа для оптимизации агроландшафтов. Часть 2. Плодородие. 3(30): 38-39.
- Михайленко И. М., Тимошин В. Н., Мисюрин С. В., Цыганова Н. А. 2010. Оптимизация водного режима агроландшафта. Экологические системы и приборы. 6: 55-60
- Моисеев Н. Н. 1975. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука.
- Пегов С. А., Хомяков П. М. 1991. Моделирование и развитие экологических систем. М.
- Шабанов В. В. 1985. Математические модели комплексных мелиораций при использовании имитационной системы в режиме оптимизации. Комплексное мелиоративное регулирование. Сб. научных трудов МГМИ. М.