

УДК 502/504:631.6:626/627

*Д. А. Манукьян, доктор техн. наук**Н. П. Карпенко, доктор техн. наук*

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Приведены результаты исследований по оценке экологической безопасности функционирования гидромелиоративных систем. Представлены термодинамические и гидродинамические показатели, обоснованы их экологически допустимые величины для систем, расположенных в различных ландшафтно-климатических зонах.*

*There are given the research results on the evaluation of the ecological safety of functioning of hydraulic reclamation systems using the system of thermodynamic and hydrodynamic indicators and proposed their ecologically admissible values for the systems located in different landscapes-climatic zones.*

Интенсификация сельскохозяйственного производства характеризуется прогрессивным освоением природно-ресурсного потенциала агроландшафтов, их рациональным использованием, сохранением, восстановлением и повышением плодородия почв. При решении проблемы экологического нормирования необходимо оценить различные антропогенные нагрузки на агроландшафты и ввести экологические ограничения на те или иные мелиоративные мероприятия. Задача авторов — оценить влияние мелиоративных мероприятий и осуществить их нормирование с использованием системы термодинамических и гидродинамических показателей в экологически допустимых пределах. Использование термодинамических показателей базируется на изучении направления протекания неравновесных процессов и закономерностей энергетических превращений в природных системах. Теплообмен в системе «почвенный покров — атмосфера» зависит от многих природных факторов, и в этой открытой системе основной источник поступления тепла — солнечная энергия.

В системе термодинамических показателей (показатели рассматриваются как потоковые, единица измерения —

килоджоуль на квадратный сантиметр) выделяются следующие комплексные показатели: радиационный баланс подстилающей поверхности почв, «индекс сухости» Будыко, энергия почвообразования, расчетные зависимости [1].

Как показывают расчеты, структура термодинамического баланса почв агроландшафтов при проведении гидротехнической мелиорации существенно меняется. Например, в оросительных системах отклонение отдельных энергетических показателей при экологически благоприятных оросительных нормах составляет 4...50 % (и более) от естественных значений.

Поток лучистой энергии Солнца трансформируется в тепловую энергию, и на поверхности земли радиационный баланс имеет следующий вид [1, 2]:

$$R = LE \pm B + A, \quad (1)$$

где  $R$  — радиационный баланс;  $LE$  — суммарные затраты на испарение;  $L$  — скрытая теплота испарения;  $B$  — турбулентный теплообмен между атмосферой и поверхностью почвы;  $A$  — поток тепла между поверхностью почвы и нижележащими слоями.

Значимую роль в оценке уровня антропогенной нагрузки и степени трансформации агроландшафтов играет характеристика теплообмена в системе «почвенный покров — атмосфера». Современный подход к оценке

антропогенных нагрузок включает рассмотрение отдельных термодинамических составляющих процесса теплообмена и анализ всей структуры теплового баланса. Некоторая интегральная функция  $S$  состояния любой открытой термодинамической системы, к которой относится и система «почвенный покров — атмосфера», характеризует не только составляющие термодинамического баланса, но и направление протекания процессов теплообмена между системой и внешней средой [3].

Авторы предлагают рассматривать изменение термодинамического баланса не только в годовом разрезе, но и с учетом различных периодов функционирования агроландшафтов — в вегетационный и межвегетационный периоды. Уравнение годового теплового баланса подстилающей поверхности представлено уравнением (1). В вегетационный же период отличной от нуля становится величина «полезной используемой» работы системы  $Q_n$ , а также поступление энергии в систему в результате массообмена  $\sum_{i=1}^{i=n} M_i \mu_i$  ( $M_i$  — масса  $i$ -го компонента;  $\mu_i$  — химический потенциал, характеризующий скорость обмена). Тогда уравнение (1) трансформируется:

$$R = LE \pm B - Q_n + \sum_{i=1}^{i=n} M_i \mu_i. \quad (2)$$

Наряду с комплексными параметрами по оценке состояния агроландшафта на основе приведенного теплового баланса (1) для подстилающей поверхности авторы предлагают использовать интегральный термодинамический показатель — результирующий энергообмен почв с окружающей средой [4]. Нормируя данное уравнение по величине  $LE$ , выражающей внутренний (латентный) теплообмен, получим следующее выражение:

$$\frac{R}{LE} \pm \frac{B}{LE} = 1 + \frac{A}{LE}. \quad (3)$$

В данном случае структура уравнения теплового баланса, а также интенсивность и направленность процес-

сов теплообмена в испарительной системе будут определяться следующими интегральными показателями:

$$R/LE; B/LE; 1 + A/LE.$$

*Первый* показатель  $M_M = R/LE$  показывает долю всей приходящейся на поверхность почвы солнечной энергии, затрачиваемой на испарение; он соответствует коэффициенту «полезного действия» системы и определяется степенью увлажненности территории в естественных условиях и при мелиоративном воздействии. Следует отметить, что в летний период параметр  $M_M$  имеет максимальные значения ( $M_M \rightarrow \max$ ); осенью и в предзимний период он уменьшается до нуля из-за заметного сокращения радиационного баланса. Если при этом  $R/LE < 1$  и  $E \neq 0$ , то энергия, затрачиваемая на испарение, забирается из почвы.

*Второй* показатель  $B/LE = B_0$  (число Боуэна) показывает соотношение внутреннего (латентного) и внешнего (явного) турбулентного теплообмена в системе «подстилающая поверхность — атмосфера». Данный параметр уменьшается при увеличении увлажненности почвы и возрастает при ее иссушении.

*Третий* показатель  $M_M - B_0 = 1 + A/LE$  характеризует интенсивность и направленность процессов теплообмена атмосферы с почвой в процессе испарения при  $E \neq 0$ . Соответственно при  $M_M - B_0 > 0$  происходит поступление тепла в почву, а при  $M_M - B_0 < 0$  наблюдается процесс отдачи тепла в атмосферу.

Как показывает проведенный анализ, структура балансового уравнения (3) при антропогенных воздействиях существенно меняется. Так, в естественных условиях доминирующей составляющей является турбулентный теплообмен почвенного покрова с приземным слоем атмосферы, а при мелиоративных нагрузках увеличивается «полезно используемая» работа, преобразуемая в энергию почвообразования. Поскольку величина массообмена отличается «медленным временем» протекания по сравнению с радиационным

и тепловым потоком, целесообразно рассматривать эти составляющие раздельно и при гидротехнической мелиорации приближенно оценивать интенсивность энергообмена почв агроландшафта с атмосферой:

$$J(U) = R - Q_{\text{П}},$$

где  $J(U)$  — интенсивность энергообмена;  $R$  — радиационный баланс;  $Q$  — энергия почвообразования [4, 5].

Следует отметить, что из всего комплекса антропогенных нагрузок только мелиоративная деятельность способна снижать интенсивность энергообмена за счет совершаемой природной системой работы в виде увеличения затрат энергии на испарение, на процессы почвообразования и производство биомассы.

В качестве обобщенного интегрального показателя оценки состояния гидромелиоративных систем и критерия оценки экологической безопасности их функционирования предлагается использовать коэффициент термодинамического состояния —  $K_J$ , который может быть представлен в следующем виде:

$$K_J = \frac{J(U)^{\text{ест}} - J(U)^{\text{м}}}{J(U)^{\text{ест}}} = 1 - \frac{J(U)^{\text{м}}}{J(U)^{\text{ест}}}, \quad (4)$$

где  $J(U)^{\text{ест}}$  — интенсивность энергии теплообмена в естественных условиях;  $J(U)^{\text{м}}$  — интенсивность энергии теплообмена при мелиоративных мероприятиях.

Предложенный подход реализован для условий гидромелиоративных систем, расположенных в различных ландшафтно-географических зонах. Рассчитаны величины радиационного баланса, энергии почвообразования и интенсивности энергообмена в естественных условиях и при проведении гидротехнической мелиорации (орошение или осушение). Результаты показали, что в режиме гидротехнической мелиорации происходит изменение термодинамических показателей (в среднем от 5 до 15 %), снижается интенсивность энергообмена, увеличивается «полезная работа», совершаемая системой, что, в конечном счете, снижает общую энтропию системы. В качестве ориентировочных критериев экологической безопасности функционирования агроландшафтов (по коэффициенту термодинамического состояния) можно принять диапазон от 0 до 0,55 в зависимости от природно-климатической зоны (табл. 1).

В перечень показателей, по которым следует вводить нормативные ограничения, целесообразно включать и гидродинамические показатели: в зоне орошения — объем водоподачи, величина ирригационного питания, величина

Таблица 1

**Термодинамические показатели и оценка режима функционирования агроландшафтов при проведении гидротехнической мелиорации в различных ландшафтно-климатических зонах**

Ландшафтно-географическая зона	Термодинамические показатели в естественных условиях			Термодинамические показатели при мелиоративных нагрузках			Коэффициент термодинамического состояния $K_J = \frac{J(U)^{\text{м}}}{J(U)^{\text{ест}}}$	Оценка режима функционирования		
	Радиационный баланс $R^{\text{ест}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год	Энергия почвообразования $Q_{\text{П}}^{\text{ест}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год	Энергообмен, $J(U)^{\text{ест}} = R^{\text{ест}} - Q_{\text{П}}^{\text{ест}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год	Радиационный баланс $R^{\text{м}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год;	Энергия почвообразования $Q_{\text{П}}^{\text{м}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год	Энергообмен $J(U)^{\text{м}} = R^{\text{м}} - Q_{\text{П}}^{\text{м}}$ , кДж/см <sup>2</sup> в год		Экологически безопасный	Экологически допустимый	Экологически опасный
Лесная	129	88	41	121	81	40	0,02	0...0,05	0,05...0,08	> 0,08
Лесостепная	155	89	66	160	96	64	0 03	0...0,06	0,06...0,10	> 0,10
Степная	165	90	75	170	100	70		0...0,10	0,10...0,15	> 0,15
Сухостепная	197	74	123	210	129	81	0,34	0...0,35	0,35...0,40	> 0,40
Полупустынная	200	55	145	220	138	82	0,43	0...0,45	0,45...0,50	> 0,50
Пустынная	230	34	196	265	174	91	0,54	0...0,55	0,55...0,65	> 0,65

на инфильтрационного питания, уровень грунтовых вод; в зоне осушения — норма осушения и отвод сбросных вод.

Основные характеристики режима подземных вод в естественных условиях формируются преимущественно под влиянием следующих факторов: климатических, включающих в себя атмосферные осадки, температуру воздуха, испарение и другие, биологических, характеризующих растительный покров и определяющих величину транспирации.

В условиях регулярного орошения за счет значительного увеличения приходной статьи баланса рассматриваемых агроландшафтов существенно меняется водный баланс зоны аэрации и зоны насыщения. Скорость подъема уровня грунтовых вод в значительной степени зависит от условий естественного и искусственного дренирования исследуемой территории.

При мелиоративных воздействиях, и особенно при орошении, величина водообмена между почвенными и грунтовыми водами, как индикатор взаимодействия между биологическим и геологическим круговоротами, является одним из первостепенных и наиболее жестких экологических ограничений при оценке устойчивости мелиорируемых агроландшафтов.

Анализ закономерностей питания грунтовых вод на орошаемых землях позволяет сделать вывод: основными источниками дополнительной, приходной статьи баланса грунтовых вод  $W_{\text{ир}}$  в пределах гидромелиоративных систем являются: потери оросительной воды при поливах  $W_{\text{инф}}$  и фильтрационные потери из каналов  $\Phi_{\text{к}}$  ( $W_{\text{ир}} = \Phi_{\text{к}} + W_{\text{инф}}$ ).

В процессе оросительной мелиорации ирригационное питание грунтовых вод (включающее инфильтрационное питание при поливах и фильтрационные потери из ирригационных каналов) изменяется в соответствии с режимом полива и является основным гидродинамическим показателем, по которому необходимо вводить ограничения. Поэтому при оценке инфильтрационного

питания в режиме полива и в начале процесса подъема уровня грунтовых вод следует учитывать возможность транзитных потоков оросительной воды через корнеобитаемый слой в объемах, достигающих, как правило, около 20 % от суммарных потерь воды на фильтрацию.

Значимый гидродинамический показатель — фильтрационные потери из оросительной сети. Фильтрационные потери из крупных магистральных каналов, межхозяйственной и внутрихозяйственной сети могут быть значительными: в крупных магистральных каналах фильтрационные потери достигают 40...50 % расхода канала, особенно на землях нового освоения в режиме свободной фильтрации, где скорость подъема уровня грунтовых вод достигает 2,5...3,0 м и более в год. При длительных периодах эксплуатации магистральных каналов они становятся региональными границами для транзитных фильтрационных потоков как грунтовых, так и напорных вод, создавая тем самым исходно высокую поверхность зеркала грунтовых вод (и нередко пьезометрической поверхности), на которую накладывается подъем уровня грунтовых вод от орошения. Факты негативных последствий, связанные со значительными фильтрационными потерями воды из каналов, в частности создание «местного» подпора и подъема уровня грунтовых вод, активизация процессов засоления и заболачивания и другие, и, как результат, ухудшение мелиоративного и экологического состояния на прилегающих землях позволяет сделать вывод о целесообразности проведения противофильтрационных мероприятий и повышения КПД каналов.

При проектировании в зоне орошения мелиорируемых агроландшафтов вопросы изучения механизма процесса водообмена и обоснования экологически допустимых пределов величины ирригационного питания грунтовых вод являются наиболее значимыми. Обобщение значительного количества фактичес-

ких данных и модельных расчетов показывает, что в многолетнем разрезе величина инфильтрационного питания слабо зависит от строения зоны аэрации, а в наибольшей степени на нее влияют способы орошения, тип почв, объем оросительной воды [6].

Для различных ландшафтно-климатических зон были обобщены фактические данные по величинам инфильтрационного питания грунтовых вод, потерям воды из каналов и оросительной сети и рассчитано суммарное ирри-

гационное питание грунтовых вод при существующем техническом и технологическом уровне развития оросительной мелиорации. В зависимости от суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур, требуемого для получения биологического урожая, были предложены следующие экологические критерии ограничения суммарного ирригационного питания грунтовых вод: 45...55 мм — для лесостепной зоны; 100...120 мм — для сухостепной зоны; 140...150 мм — для пустынной зоны (табл. 2).

Таблица 2

**Экологически допустимые величины антропогенной нагрузки на агроландшафт при проведении гидротехнической мелиорации в различных ландшафтно-климатических зонах**

Ландшафтно-географическая зона	Среднегодовое количество осадков, мм	Суммарное водопотребление, мм	Экологически благоприятная оросительная норма (в числителе – норма в миллиметрах, в знаменателе – способ полива)	Величина инфильтрационного питания грунтовых вод, мм	Потери из оросительной сети, мм	Суммарное ирригационное питание грунтовых вод, мм	Суммарное испарение, мм	Экологические ограничения на ирригационное питание грунтовых вод (в числителе – норма в миллиметрах, в знаменателе – % от суммарного испарения)
Лесостепная	550	560	<u>100...200</u> дождевание	10...12	15...20	25...30	500...550	<u>(45...55) мм</u> (5...8) %
Степная	470	580	<u>200...250</u> дождевание	20...25	25...30	45...55	750...800	<u>(60...75) мм</u> (8...10) %
Сухостепная	350	670	<u>300...450</u> дождевание	45...60	35...40	80...90	800...900	<u>(100...120) мм</u> (10...12) %
Полупустынная	250	720	<u>400...600</u> дождевание	60...65	45...50	90...100	900...950	<u>(130...140) мм</u> (12...15) %
Пустынная	180	800	<u>480...650</u> дождевание	70...75	50...55	110...120	950...1000	<u>(140...150) мм</u> (12...15) %

**Выводы**

Источники и установленные закономерности изменения ирригационного питания грунтовых вод в различных природно-климатических зонах показывают, что лишь путем создания современных совершенных гидромелиоративных систем инженерного типа можно минимизировать антропогенную нагрузку на природную среду и обеспечить функционирование мелиорируемых агроландшафтов в пределах заданных экологических регламентов и нормативов.

По интегральным термодинамическим и гидродинамическим пока-

зателям состояния агроландшафтов можно охарактеризовать режим функционирования мелиоративной системы и дать экологическую оценку последствий антропогенной нагрузки. Предложенные критерии позволяют выявить тенденцию в развитии природной системы, определить периоды изменения ее состояния и точки бифуркации, которые регламентируют дальнейшее «поведение» системы в зависимости от вида антропогенной деятельности. Проведение плано-предупредительных, природоохранных и других видов работ позволяет сократить капитальные

затраты на восстановление параметров природно-технической системы и ликвидацию негативных последствий. Благодаря такой деятельности сохраняется и повышается экологическая безопасность функционирования мелиоративных систем.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, оценка устойчивости мелиорируемых агроландшафтов, термодинамические показатели, интенсивность энергообмена.

#### Список литературы

1. Будыко, М. И. Тепловой баланс земной поверхности [Текст] / М. И. Будыко. — Л. : Гидрометеоздат, 1956. — 225 с.
2. Волобуев, В. Р. Введение в энергетику почвообразования [Текст] / В. Р. Волобуев. — М. : Наука, 1974. — 128 с.
3. Кеплен, С. Р. Биоэнергетика и линей-

ная термодинамика необратимых процессов [Текст] / С. Р. Кеплен, Э. Эсиг ; пер. с англ. — М. : Мир, 1986. — 384 с.

4. Карпенко, Н. П. Энергетическая оценка состояния геосистем при проведении комплексных мелиораций [Текст] / Н. П. Карпенко, Д. А. Манукьян // Методы и технологии комплексной мелиорации и экосистемного водопользования : науч. издание. — М. : МГУП, 2006. — С. 27–37.

5. Манукьян, Д. А. Экологическая безопасность функционирования техноприродных систем: состояние, проблемы и пути решения [Текст] : монография / Д. А. Манукьян, Н. П. Карпенко. — М.: МГУП, 2007. — 294 с.

6. Яшин, В. М. Обоснование экологически допустимых норм инфильтрационных потерь оросительной воды [Текст] / В. М. Яшин // Мелиорация и водное хозяйство. — 1998. — № 4. — С. 22–25.

УДК 502/504:627.83

**М. Е. Вершинская**, ведущий специалист

ЗАО ПО «СОВИНТЕРВОД»

**В. В. Шабанов**, доктор техн. наук, профессор

**В. Н. Маркин**, канд. техн. наук, профессор

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ЭКОЛОГО-ВОДОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВОДОСБОРА И ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В БАССЕЙНЕ ИРТЫША

*В статье рассмотрены новые подходы к определению экологического состояния водной системы (водный объект + водосбор). Впервые сделана попытка учета влияния водосбора исходя из географо-водохозяйственных позиций. Применения методики показано на примере бассейна реки Иртыш.*

*In clause new approaches to definition of an ecological condition of water system (water object + reservoir) are considered. For the first time attempt of the account of influence of a reservoir proceeding from geography and water-economic positions is made. Applications of a technique it is shown on an example of a river basin Irtysh.*

**Основные методические положения оценки потенциала активности самоочищения водосборной площади.** Потенциал самоочищения природной среды водосборных площадей водных объектов можно рассматривать как интегральную экологическую оценку тех сложных процессов и явлений, которые возникают при техногенном загрязнении. Именно через определение потен-

циала самоочищения природной среды появляется возможность установить степень влияния, участия водосборных площадей в формировании эколого-водохозяйственного состояния водных объектов. Потенциал самоочищения природной среды есть потенциал ее устойчивости к техногенным воздействиям. Методическое решение данной задачи осуществляют эмпирически,