

## МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.67

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-144-160

### Система регионально-адаптированных индикаторов для целей устойчивой интенсификации орошаемого земледелия

**Инна Владимировна Орлова**

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Российская Федерация, inna\_orlova11@mail.ru,  
<http://orcid.org/0000-0002-7644-8763>

**Аннотация.** Цель: разработать и обосновать систему регионально-адаптированных индикаторов, отражающих геопространственные закономерности, взаимосвязи и уязвимости функционирования систем орошаемого земледелия, в целях его устойчивой интенсификации. **Материалы и методы.** Исследование проводилось на основе системного подхода с применением методов главных компонент, рейтинговой и балльной оценок, кластерного анализа, способа пропорциональных расходов, оценочных шкал. База данных для расчетов сформирована на основе данных федеральных и региональных учреждений РФ, портала Всероссийского научно-исследовательского института систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», предприятий и администраций муниципальных районов Западной Сибири. **Результаты.** Разработана система регионально-адаптированных геопространственных индикаторов для целей устойчивой интенсификации орошаемого земледелия, включающая в себя два блока: структурно-функциональный и геоэкологический. Обоснованы принципы отбора показателей, адаптированных к региональному масштабу и апробированных на макрорегиональном, ландшафтно-провинциальном, бассейновом и районном территориальных уровнях Западной Сибири. Структурно-функциональный блок включает 45 показателей, отражающих как главные движущие силы, факторы и уязвимости функционирования систем орошаемого земледелия, так и процессы их причинно-следственных взаимосвязей с системами высшего порядка, что способствует изучению закономерностей пространственно-временной дифференциации и выявлению перспективных территорий. Геоэкологический блок объединяет 40 показателей, которые помогают оценивать и планировать развитие орошаемого земледелия с учетом геоэкологических ограничений. **Выводы:** предлагаемая система регионально-адаптированных индикаторов является эффективным инструментом поддержки принятия стратегических решений для реализации региональной политики устойчивой интенсификации орошаемого земледелия.

**Ключевые слова:** орошаемое земледелие, система индикаторов, междисциплинарный подход, устойчивая интенсификация, регион, Западная Сибирь

**Сведения о научно-исследовательской работе, по результатам которой публикуется статья:** исследование выполнено в рамках государственного задания № FUFZ-2021-0007 «Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг».

**Для цитирования:** Орлова И. В. Система регионально-адаптированных индикаторов для целей устойчивой интенсификации орошаемого земледелия // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 144–160. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-144-160>.

## LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

### **Regionally adapted indicators' system for sustainable intensification of irrigated agriculture**

**Inna V. Orlova**

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russian Federation, inna\_orlova11@mail.ru,  
<http://orcid.org/0000-0002-7644-8763>

**Abstract. Purpose:** to develop and substantiate a system of regionally adapted indicators reflecting geospatial patterns, relationships and vulnerabilities of the irrigated farming systems functioning, for its sustainable intensification. **Materials and methods.** The study was carried out on the basis of a systematic approach using the principal component method, rating and scoring methods, cluster analysis, proportional costs method, and estimation scales. The database for calculations was formed on the basis of data from federal and regional institutions of the Russian Federation, the portal of the All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga”, enterprises and administrations of municipal districts of Western Siberia. **Results.** A system of regionally adapted geospatial indicators for sustainable intensification of irrigated agriculture, which includes two blocks: structural-functional and geocological, has been developed. The principles for selecting indicators adapted to the regional scale and tested at the macro-regional, landscape-provincial, basin and district territorial levels of Western Siberia are substantiated. The structural-functional block includes 45 indicators reflecting both the main driving forces, factors and vulnerabilities of the irrigated farming systems functioning, as well as the processes of their cause-and-effect relationships with higher-order systems, which contributes to the study of regularities of spatio-temporal differentiation and identifying areas of interest. The geocological block combines 40 indicators that help assessing and planning the development of irrigated agriculture, taking into account the geocological limitations. **Conclusions:** the proposed system of regionally adapted indicators is an effective tool strategic decision support for the implementation of regional policies of sustainable intensification of irrigated agriculture.

**Keywords:** irrigated agriculture, indicators system, interdisciplinary approach, sustainable intensification, region, Western Siberia

**Information about the research work, on results of which the article is published:** the research was carried out within the framework of state assignment no. FUFZ-2021-0007 “Natural and natural-economic systems of Siberia under the conditions of modern challenges: diagnosis of conditions, adaptive capabilities, potential of ecosystem services”.

**For citation:** Orlova I. V. Regionally adapted indicators' system for sustainable intensification of irrigated agriculture. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(4): 144–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-144-160>.

**Введение.** Удовлетворение растущего глобального спроса на сельскохозяйственную продукцию без истощения ограниченных природных ресурсов представляет собой серьезную проблему, в решении которой важная стратегическая роль принадлежит устойчивой интенсификации (СИ) использования орошаемых земель [1].

Осознание того, что обеспечение необходимого производства продуктов питания зависит не столько от дальнейшего расширения орошаемых площадей и внесения больших доз минеральных удобрений [2], сколько от сбалансированного развития орошаемого земледелия с учетом геоэкологических ограничений, актуализирует разработку эффективных инструментов поддержки политики SI на основе систем взаимосвязанных индикаторов, способных отображать разные экологические и социально-экономические аспекты устойчивого геопространственного развития.

К настоящему времени предложено много систем индикаторов для целей устойчивого развития орошаемых земель; широкую известность среди них получили критериальные показатели оценки пригодности и потенциала земель для орошения [3, 4]; система SIRIUS [5]; система показателей WEFN на основе индексов взаимосвязи «вода – энергия – еда» [6]; индикаторы измерения устойчивости сельскохозяйственных систем [7] и др. Однако, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в предыдущих исследованиях, сохраняются некоторые пробелы в полноте используемых индикаторов для измерения геопространственных аспектов SI региональных моделей орошаемого земледелия. Так, большинство исследований либо акцентируется на отдельных аспектах устойчивого развития орошаемых систем, чаще всего проблемах ирригационного водопользования или засоления почв [8], либо фокусируется на локальных масштабах (уровня фермы, поля, ирригационной системы) [5, 6].

Для региональных же систем орошаемого земледелия, в частности, таких крупных макрорегионов, как Западная Сибирь, предложены системы показателей преимущественно для решения задач районирования территории (например, природно-мелиоративного или гидролого-климатического [9]), комплексных оценок эколого-мелиоративного состояния орошаемых земель [10] и др.

Расширенной же целостной системы регионально-адаптированных индикаторов для измерения геопространственных аспектов функционирования и развития орошаемого земледелия в целях поддержки политики его устойчивой интенсификации до последнего времени предложено не было. Во многом это обусловлено ярко выраженной территориальной дифференциацией, многомерностью и сложностью региональных мелиоративно-социально-экологических систем, что требует использования междисциплинарного системного подхода к разработке системы показателей и индексов, особенно если учесть, что именно на региональном уровне происходит централизация и связывание динамических процессов, протекающих в моделях локального и глобального масштаба [11, 12]. Также именно на этом уровне происходит объединение процессов взаимодействия человека и окружающей среды, обеспечивается общая платформа для ученых, проектировщиков, политиков и заинтересованных сторон для сотрудничества в области изучения и практической реализации различных аспектов SI [12].

Цель данной работы – разработать и обосновать систему регионально-адаптированных индикаторов, отражающих геопространственные закономерности, взаимосвязи и уязвимости функционирования систем орошаемого земледелия, в целях его устойчивой интенсификации.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось на основе системного подхода с применением методов главных компонент, рейтинговой и балльной оценок, кластерного анализа, картографирования, сравнительно-географического метода, эколого-ландшафтного подхода, способов построения оценочных шкал показателей, анкетирования и др.

Область исследования охватывает регионы, полностью расположенные в физико-географических границах российской части крупнейшего макрорегиона мира – Западной Сибири, во многом совпадающей с границами Обь-Иртышского бассейна (Алтайский край, Республика Алтай, Тю-

менская, Томская, Омская, Новосибирская, Кемеровская и Курганская области). Объектами апробации индикаторов стали те территории, на которых по состоянию на 01.01.2019 имелись орошаемые земли, состоящие на учете в земельном кадастре РФ.

База данных сформирована на основе базы данных ИВЭП СО РАН, данных региональных управлений мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения РФ, Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, Федерального агентства водных ресурсов, Федерального агентства по недропользованию, информационного портала федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», предприятий, администраций регионов и муниципальных районов, а также опубликованных литературных, статистических и картографических данных.

**Результаты и обсуждение.** В результате данного исследования разработана и обоснована система регионально-адаптированных геопространственных индикаторов, которая включает в себя два блока: структурно-функциональный и геоэкологический (таблицы 1, 2).

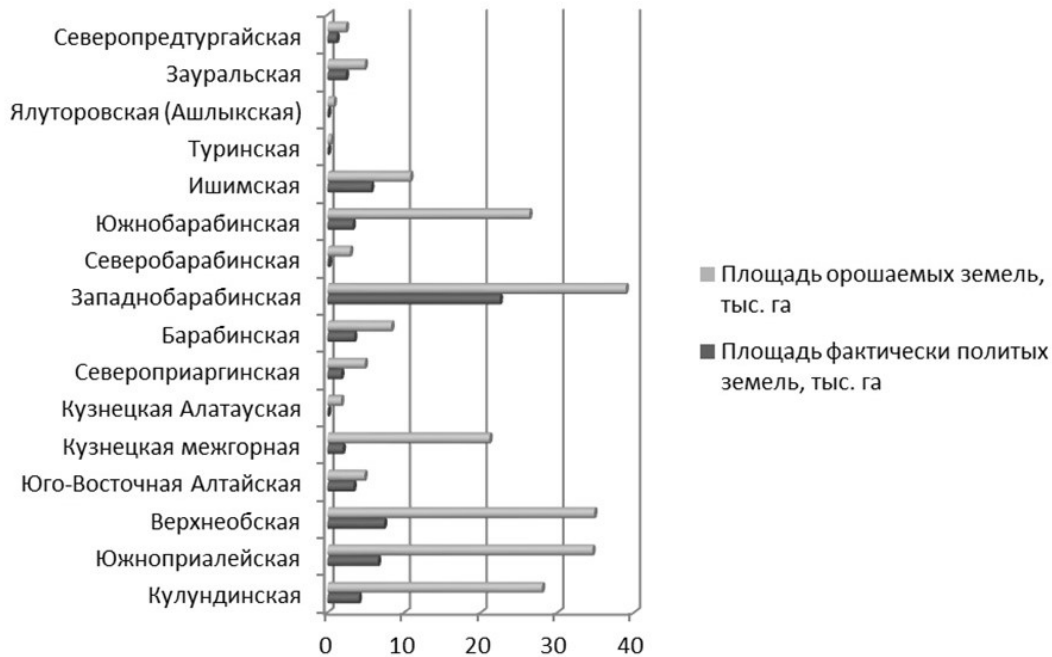
*Структурно-функциональный блок* состоит из 45 индикаторов, сгруппированных в четыре группы, каждая из которых отображает разные аспекты функционирования региональных систем орошаемого земледелия и ключевые взаимосвязи между его геопространственными структурами в условиях Западной Сибири. Так, показатели первой группы этого блока позволяют исследовать пространственно-временную динамику орошаемых и фактически поливаемых земель на уровне ландшафтных провинций такого большого и глобально значимого макрорегиона, как Обь-Иртышский бассейн (рисунок 1).

**Таблица 1 – Структурно-функциональный блок системы региональных геопространственных индикаторов**  
**Table 1 – Structural-functional block of the regional geospatial indicators' system**

Показатель и индикатор	Метод компиляции и агрегирования показателей	Функция и цель	Масштаб, апробация
1.1 Площадь орошаемых и фактически поливаемых земель; площадь ландшафтных провинций Обь-Иртышского бассейна; доля орошаемых земель в площади ландшафтных провинций	Картографический, математико-статистический, сравнительно-географический	Изучение пространственно-временной динамики распределения орошаемых и фактически поливаемых площадей	Ландшафтно-провинциальный, Обь-Иртышский бассейн
1.2 Площадь орошаемых земель (без земель в неудовлетворительном мелиоративном состоянии); площадь фактически поливаемых земель; разрешенный (проектный) объем годового водозабора на орошение; поголовье скота; численность населения; дефицит увлажнения за вегетационный период	Агрегирование в интегральный индекс ирригационного землепользования (ILUI) на основе метода главных компонент и кластерного анализа	Оценка степени благоприятности параметров геоирригационной обстановки и уровня функционирования орошаемых земель; исследование закономерностей пространственной дифференциации землепользования	Макрорегиональный и региональный, Западная Сибирь, Алтайский регион в разрезе муниципальных районов
1.3 Площадь естественных пастбищ и сенокосов, приходящаяся на голову скота; урожайность и валовой сбор кормовых культур, их посевные площади, приходящиеся на голову скота; объем фактически использованной воды на полив культур; посевные площади картофеля и овощей; валовой сбор и объемы реализации продукции и др.	Рейтинговая оценка, сравнительно-географический и аналитический методы	Выявление территориальных различий и причинно-следственных взаимосвязей между факторами геоирригационной обстановки и особенностями функционирования системы более высокого ранга – сельскохозяйственного землепользования	Региональный, Алтайский регион в разрезе муниципальных районов
1.4 Уровень мелиоративной нагруженности агроландшафтов; площадь орошаемых земель в неудовлетворительном мелиоративном состоянии; гидротермический коэффициент; степень засоления почв; уровень подъема грунтовых вод; стоимость электроэнергии для предприятий; расстояние до регионального центра; процент износа гидромелиоративных сооружений и др.	Агрегирование в интегральный индекс дисбаланса геоирригационной обстановки (GISI) на основе метода главных компонент	Диагностика адаптационного потенциала землепользования на орошаемых землях и оценка уязвимости его ключевых элементов, мониторинг геоирригационной обстановки	Региональный, юго-восток Западной Сибири в разрезе муниципальных районов

**Таблица 2 – Геоэкологический блок системы региональных геопространственных индикаторов**  
**Table 2 – Geoecological block of the regional geospatial indicators' system**

Показатель и индикатор	Метод компиляции и агрегирования показателей	Функция и цель	Масштаб, апробация
2.1 Коэффициент увлажнения; мощность зоны аэрации; дренированность территории; геохимическое положение ландшафта; уклон поверхности, тип и степень горизонтального расчленения рельефа; глубина залегания и степень минерализации грунтовых вод; содержание гумуса в минеральном профиле почв; мощность гумусового горизонта; характер гидроморфности и гранулометрический состав почв; общая пористость почвы; водопроницаемость и влагоемкость почвы; содержание водорастворимых солей, водно-физические свойства почв и др.	Оценочные шкалы критериев ландшафтных и почвенных показателей на основе системного эколого-ландшафтного подхода	Оценка пригодности земель для орошения с учетом геоэкологических ограничений и допустимых пределов развития орошаемого земледелия	Ландшафтный, ландшафты Благовещенского района Алтайского края
2.2 Сток рек заданной обеспеченности; экологически допустимый сток; экологически допустимый объем изъятия стока рек для орошения	Способ пропорциональных расходов и сезонных ограничений; методы наименьших квадратов и наибольшего правдоподобия	Оценка экологически допустимых объемов изъятия стока рек для орошения	Бассейновый, бассейны р. Бурла, Кулунда, Кучук Кулундинской ландшафтной провинции
2.3 Предельно допустимая насыщенность агроландшафтов орошаемыми землями; прирост овражно-балочных систем, уровень залегания водоупорных пород; степень подтопления земель; степень повышения или понижения уровня грунтовых вод; процент осолонцевания и вторичного засоления орошаемых почв; снижение мощности гумусового горизонта и содержания гумуса; степень эрозии и дефляции почв; степень загрязнения почвенных и водных ресурсов; площадь слабосмытых и переувлажненных почв; эродированность пахотных земель и др.	Геосистемный подход на основе сочетания количественной оценки и качественного анализа	Мониторинг эколого-мелиоративного состояния агроландшафтов и прилегающих территорий, выявление экологических проблем в условиях интенсивного использования орошаемых земель, изучение взаимосвязей между их проявлениями и спецификой функционирования орошаемого земледелия	Региональный, муниципальные районы Западной Сибири с площадями поливаемых земель более 1 тыс. га



**Рисунок 1 – Площадь орошаемых земель, состоящих на учете в земельном кадастре РФ (в т. ч. фактически политых земель), ландшафтных провинций Обь-Иртышского бассейна в среднем за 2018–2020 гг.**

**Figure 1 – Area of irrigated lands registered in the Land Cadastre of the Russian Federation (including actually irrigated lands), landscape provinces of the Ob-Irtysh basin on average for 2018–2020**

Включение показателей, ориентированных на масштаб крупного водосборного бассейна, обусловлено также необходимостью решения проблем, препятствующих эффективной разработке мероприятий СИ, таких как образование большого количества землепользований, систематическое изменение положения их границ, создание чересполосицы и др. [13].

Показатели второй группы составляют основу индекса ирригационного землепользования (ILUI), задача которого – интегрировать информацию о ключевых характеристиках, взаимосвязях и факторах геопространства, определяющих территориальную специфику функционирования и дифференциации землепользования на орошаемых землях муниципальных районов по степени благоприятности сочетания параметров геоиригационной обстановки и уровня функционирования орошаемых земель [11]. С помощью индекса ILUI возможно также выявление, ранжирование и



сравнение типов землепользования, в т. ч. в динамике, определение наиболее перспективных районов Западной Сибири для его SI.

Опыт построения индекса ILUI показал, что региональный масштаб накладывает ограничения для агрегирования ряда показателей, например, урожайности или рентабельности поливаемых сельхозкультур. Это связано со сложностями, которые препятствуют усреднению количественно разной информации для таких крупных по площади территорий, как муниципальные районы, поскольку критически снижают ее информативность:

1) нецелесообразностью объединения для усреднения таких показателей, как урожайность различных поливаемых культур в Западной Сибири, например, многолетних трав (40–80 ц/га) и картофеля (200–400 ц/га) или капусты (500–600 ц/га) и сои (22 ц/га) (по данным руководителей сельхозпредприятий Западной Сибири);

2) неоднородностью посевов поливаемых сельхозкультур, при которой в одних районах поливают только ограниченное количество культур (однолетние травы в Кош-Агачском районе), а в других наблюдается весьма пестрая структура поливаемых площадей. Например, в Омском районе более 50 % площадей занимают картофель и овощи, 20 % – кормовые культуры, 3 % – зерновые, 10–12 % – прочие культуры;

3) сильным влиянием на урожайность сельхозкультур технологий полива (дождевание, капельное или лиманное орошение, обводнение пастбищ);

4) несовершенством требований к системам отчетности региональных и федеральных департаментов (министерств) РФ, согласно которым сельхозпроизводители предоставляют сведения в целом по всей площади выращиваемых культур, включая богарные, не выделяя при этом отдельно данные об урожайности именно поливаемых культур.

Вышеуказанные ограничения были частично сняты автором с помощью включения в систему индикаторов показателей третьей группы, которые позволяют количественно отображать причинно-следственные функ-

циональные взаимосвязи между факторами геоирригационной обстановки и особенностями функционирования региональной системы более высокого ранга – сельскохозяйственного землепользования [14]. Применение в данном случае рейтинговой оценки способствует сопоставлению показателей значимости и важности предмета анализа с данными других аналогичных объектов, а также показывает согласованные значения со структурой индекса ILUI и дополняет результаты его оценки [14].

В четвертой группе объединены показатели, агрегированные автором в интегральный индекс дисбаланса геоирригационной обстановки (GISI), задача которого – диагностика адаптационного потенциала землепользования на орошаемых землях на основе оценки его наиболее уязвимых элементов. Включение в систему такого индикатора обусловлено, в первую очередь, необходимостью мониторинга геоирригационной обстановки территорий с высоким уровнем использования орошаемых земель, а также потребностями общества в оперативном оказании управляющего компенсационного воздействия [15].

*Геоэкологический блок* включает в себя 40 показателей, объединенных в три группы, для выявления и предотвращения возникновения экологических проблем на основе внедрения учета геоэкологических ограничений интенсивного неконтролируемого развития орошаемого земледелия (см. таблицу 2). Это показатели, используемые для оценки климатических, геолого-геоморфологических, гидрологических и ландшафтных факторов, обуславливающих экологически допустимые пределы использования природно-ирригационного потенциала территории в процессе осуществления ирригационных мероприятий [16, 17]. При этом под геоэкологическими ограничениями понимаются требования и критерии экологически допустимого использования природно-ресурсного потенциала территории для орошения с целью сохранения устойчивости и стабильности геосистем, их средо- и ресурсовоспроизводящих функций [16].

Использование метода градации диагностических ландшафтных и почвенных показателей на основе разработанных оценочных шкал экологических критериев позволяет с допустимой достоверностью устанавливать области благоприятного экологического состояния орошаемых земель при ирригационном воздействии [4, 16, 17]. Анализ результатов исследований других авторов [17, 18], а также апробация такого подхода на примере ландшафтов Благовещенского района Алтайского края [16] показывает эффективность его применения для целей СИ орошаемого земледелия.

Важное место в разработанной системе индикаторов занимают показатели для построения индикатора экологического стока на основе способа пропорциональных расходов [19], поскольку они способствуют определению экологически допустимых изъятий стока рек на орошение [20].

И наконец, последняя группа индикаторов геоэкологического блока, разработанная на основе методических подходов исследователей [4, 17, 18], включает в себя показатели, с помощью которых возможны мониторинг и диагностика эколого-мелиоративного состояния агроландшафтов и прилегающих территорий, оценка ирригационной нагрузки на природные системы, анализ основных факторов, приводящих к обострению экологических проблем и определению способов их решения, особенно в условиях интенсивного использования орошаемых земель (см. таблицу 2).

Данное исследование показало, что для решения методических проблем, возникающих при разработке расширенных систем индикаторов, необходимо применение разных подходов к выбору и нормированию используемых показателей, это обусловлено большим разнообразием условий для орошения земель территорий крупных регионов.

Например, при рейтинговой оценке индикаторов из группы 1.3 структурно-функционального блока (см. таблицу 1), характеризующих специфику сельскохозяйственного землепользования, наиболее информативным стало использование преимущественно относительных показателей (таких

как площадь посевов кормовых культур или естественных кормовых угодий, приходящаяся на голову скота). А при построении интегрального индекса ILUI, напротив, предпочтение было отдано абсолютным (таким как площадь орошаемых и поливаемых земель или численность населения), а не относительным показателям (таким как доля орошаемых земель в общей площади или плотность населения) по причине того, что размеры территорий муниципальных районов в Западной Сибири различаются иногда на порядок. Так, площадь сельхозугодий в Черлакском районе Омской области (353,6 тыс. га) в 3,4 раза больше, чем аналогичная площадь в Упоровском районе Тюменской области (103,5 тыс. га). Из-за этой разницы доля орошаемых земель в площади сельхозугодий в Черлакском районе (2,28 %) меньше, чем в Упоровском районе (2,33 %), при том, что абсолютная площадь орошаемых земель в Черлакском районе (8,1 тыс. га) в 3,4 раза больше, чем в Упоровском районе (2,4 тыс. га).

То есть мы видим, что при использовании в данном случае относительного показателя район с большей площадью орошаемых земель (и, соответственно, большими возможностями их потенциального использования) проигрывает в сравнении с районом с меньшей площадью орошаемых земель, это искажает итоговую оценку. Поэтому обеспечение лучшей сравнимости используемых абсолютных показателей, включаемых в интегральные индексы, было достигнуто автором с помощью их нормирования по отношению к среднерегиональному значению для Западной Сибири в целом [11], что также позволило отразить как единство региональной структуры, так и степень территориальной дифференциации землепользования на орошаемых землях этого крупнейшего макрорегиона мира.

**Выводы.** Предлагаемый в данной работе подход к разработке системы регионально-адаптированных индикаторов объединяет опыт междисциплинарных исследований как в построении групп взаимосвязанных экономических, экологических и социальных показателей, так и в построении

интегральных индексов на основе подсистем показателей, что позволяет исследовать различные аспекты устойчивой интенсификации региональных систем орошаемого земледелия.

Апробация автором выбранных показателей на макрорегиональном, ландшафтно-провинциальном, бассейновом и районном территориальных уровнях Западной Сибири подтвердила целесообразность построения двухблоковой структуры системы индикаторов. Сочетание структурно-функциональных и геоэкологических показателей и индексов позволяет отображать как экологические, так и социально-экономические аспекты геопространственного развития.

Внедрение разработанной системы индикаторов в стратегические документы для реализации политики SI позволит учитывать при принятии управленческих решений пространственно-временную динамику распределения орошаемых и поливаемых земель, основные движущие силы, определяющие степень благоприятности и уязвимости элементов геоиригационной обстановки, наличие пригодных, доступных и (или) оборудованных для орошения земель и водоисточников в контексте геоэкологических ограничений, адаптационный потенциал и уязвимости землепользования на орошаемых землях, факторы, влияющие на возникновение экологических проблем и др.

Перспективой дальнейших исследований является разработка стратегий SI орошаемого земледелия Западной Сибири на основе предлагаемой системы регионально-адаптированных индикаторов.

### **Список источников**

1. Beltran-Peña A. A., Rosa L., D'Odorico P. Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15. 095004. DOI: 10.1088/1748-9326/ab9388.
2. Assessment of agricultural development alternatives (intensification of land use or expansion of sown areas) / A. Stokov, N. Shagaida, O. Lugovoy, V. Barinova, T. Lanshina, D. Ternovskiy, V. Potashnikov. 2020. 97 p. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3644357>.
3. A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin № 32. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976. 76 p.

4. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова, О. Ю. Шалашова, Г. И. Табала. Новочеркасск, 2017. 137 с.

5. A holistic framework to assess the sustainability of irrigated agricultural systems / P. Antunes, R. Santos, I. Cosme, A. Osann, A. Calera, D. De Ketelaere, A. Spiteri, M. F. Mejuto, J. Andreu, A. Momblanch, P. Nino, S. Vanino, V. Florian, M. Chitea, C. P. Çetinkaya, M. S. Sakamoto, M. Kampel, L. A. P. Sanchez, A. El-din Abdin, R. Alanasiddaiah, S. Nagarajan // *Cogent Food & Agriculture*. 2017. Vol. 3, iss. 1. 1323542. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1323542>.

6. An index-based approach for the sustainability assessment of irrigation practice based on the water-energy-food nexus framework / R. De Vito, I. Portoghese, A. Pagano, U. Fratino, M. Vurro // *Advances in Water Resources*. 2017. Vol. 110. P. 423–436. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.10.027.

7. Valizadeh N., Hayati D. Development and validation of an index to measure agricultural sustainability // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280, pt. 1. 123797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123797.

8. Система интегральных показателей оценки эффективности водопользования / В. И. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, С. Д. Дезюра, М. В. Герасименко, В. Иг. Ольгаренко // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. 2019. № 1(33). С. 139–152. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=992> (дата обращения: 15.06.2023). DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-139-152.

9. Мезенцев В. С. Гидролого-климатические основы проектирования гидромелиораций. Омск: ОмСХИ, 1993. 128 с.

10. Современные изменения мелиоративного состояния орошаемых земель Алтайского края / В. Л. Снежко, Д. М. Бенин, А. В. Шишкин, А. В. Бойко, А. В. Скрипник // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 13–22. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-13-21>.

11. Орлова И. В. Методика построения индекса ирригационного землепользования (на примере муниципальных районов Западной Сибири) // *Географический вестник = Geographical Bulletin*. 2022. № 1(60). С. 23–39. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-23-39.

12. Wu J. Linking landscape, land system and design approaches to achieve sustainability // *Journal of Land Use Science*. 2019. Vol. 14, iss. 2. P. 173–189. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1602677>.

13. Полуэктов Е. В., Сухомлинова Н. Б. Особенности адаптивно-ландшафтной организации территории водосборного бассейна в современных условиях // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. 2020. № 1(37). С. 1–16. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=646&id=647> (дата обращения: 30.05.2023). DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-1-16.

14. Орлова И. В. Интегральная оценка геоиригационной обстановки и уровня использования алтайских орошаемых земель // *Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]*. 2023. Т. 13, № 1. С. 39–57. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1339> (дата обращения: 20.06.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-39-57>.

15. Семенов С. Я., Новиков А. Е. Показатели мелиоративного состояния орошаемых земель Волгоградской области // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2023. № 1(69). С. 114–123. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11.

16. Орлова И. В. Оценка пригодности территории для орошаемого земледелия с учетом геоэкологических ограничений // *Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: тр. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 28 авг. – 1 сент. 2017 г. Барнаул, 2017. Т. 3. С. 239–248.*

17. Манжина С. А., Докучаева Л. М. Диагностические показатели оценки дегра-

дации орошаемых пашни и пастбищ // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 2. С. 101–122. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1281> (дата обращения: 15.05.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-101-122>.

18. Рекомендации по оценке экологической ситуации агроценозов орошаемых земель и прилегающих к ним территорий / сост.: А. Ю. Калинин, В. А. Шадских, Л. Г. Романова, В. Е. Кижаева, В. О. Пешкова. Энгельс: Волж. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации, 2016. 36 с.

19. Маркин В. Н. Сравнение методов определения величины экологически допустимого стока рек // Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем: материалы междунар. науч.-практ. конф. М.: МГУП, 2006. Ч. 2. С. 126–132.

20. Орлова И. В. Оценка экологически допустимых изъятий стока малых и средних рек для целей орошения // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. 2015. № 2, ч. 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22088> (дата обращения: 02.06.2023).

## References

1. Beltran-Peña A. A., Rosa L., D'Odorico P., 2020. Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture. *Environmental Research Letters*, vol. 15, 095004, DOI: 10.1088/1748-9326/ab9388.

2. Stokov A., Shagaida N., Lugovoy O., Barinova V., Lanshina T., Ternovskiy D., Potashnikov V., 2020. Assessment of agricultural development alternatives (intensification of land use or expansion of sown areas). 97 p., <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3644357>.

3. A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin № 32. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976, 76 p.

4. Shchedrin V.N., Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., Shalashova O.Yu., Tabala G.I., 2017. *Rukovodstvo po kontrolyu i regulirovaniyu pochvennogo plodorodiya oroshaemykh zemel'* [Guidelines for Control and Regulation of Soil Fertility of Irrigated Lands]. Novocherkassk, 137 p. (In Russian).

5. Antunes P., Santos R., Cosme I., Osann A., Calera A., De Ketelaere D., Spiteri A., Mejuto M.F., Andreu J., Momblanch A., Nino P., Vanino S., Florian V., Chitea M., Çetin-kaya C.P., Sakamoto M.S., Kampel M., Sanchez L.A.P., Eldin Abdin A., Alanasiddaiah R., Nagarajan S., 2017. Aholistic framework to assess the sustainability of irrigated agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, vol. 3, iss. 1, 1323542, <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1323542>.

6. De Vito R., Portoghese I., Pagano A., Fratino U., Vurro M., 2017. An index-based approach for the sustainability assessment of irrigation practice based on the water-energy-food nexus framework. *Advances in Water Resources*, vol. 110, pp. 423-436, DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.10.027.

7. Valizadeh N., Hayati D., 2021. Development and validation of an index to measure agricultural sustainability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, pt. 1, 123797, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123797.

8. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Dezyura S.D., Gerasimenko M.V., Olgarenko V.Ig., 2019. [System of integral indices of water use efficiency estimation]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(33), pp. 139-152, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=992> [accessed 15.06.2023], DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-139-152. (In Russian).

9. Mezentsev V.S., 1993. *Gidrologo-klimaticheskie osnovy proektirovaniya gidromelioratsiy* [Hydrological and Climatic Bases of Reclamation Design]. Omsk, OmSHI, 128 p. (In Russian).

10. Snezhko V.L., Benin D.M., Shishkin A.V., Boyko A.V., Skripnik A.V., 2022. *Sovremennye izmeneniya meliorativnogo sostoyaniya oroshaemykh zemel' Altayskogo kraya* [Modern changes in the reclamation state of irrigated lands of the Altai Territory]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 13-22, <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-13-21>. (In Russian).
11. Orlova I.V., 2022. *Metodika postroyeniya indeksa irrigatsionnogo zemlepol'zovaniya (na primere munitsipal'nykh rayonov Zapadnoy Sibiri)* [Irrigated land use index construction methodology (on the example of municipal districts of Western Siberia)]. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bulletin], no. 1(60), pp. 23-39, DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-23-39. (In Russian).
12. Wu J., 2019. Linking landscape, land system and design approaches to achieve sustainability. *Journal of Land Use Science*, vol. 14, iss. 2, pp. 173-189, <https://doi.org/0.1080/1747423X.2019.1602677>.
13. Poluektov E.V., Sukhomlinova N.B., 2020. [Features of adaptive landscape planning of the catchment area under modern conditions]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(37), pp. 1-16, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=646&id=647> [accessed 30.05.2023], DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-1-16. (In Russian).
14. Orlova I.V., 2023. [Integral assessment of the geo-irrigation situation and level of use of Altai irrigated lands]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 1, pp. 39-57, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1339> [accessed 20.06.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-39-57>. (In Russian).
15. Semenenko S.Ya., Novikov A.E., 2023. *Pokazateli meliorativnogo sostoyaniya oroshaemykh zemel' Volgogradskoy oblasti* [Indicators of the reclamation state of irrigated lands in Volgograd region]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 1(69), pp. 114-123, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11. (In Russian).
16. Orlova I.V., 2017. *Otsenka prigodnosti territorii dlya oroshaemogo zemledeliya s uchetom geoekologicheskikh ogranicheniy* [Assessment of the suitability of a territory for irrigated agriculture taking into account geo-ecological limitations]. *Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noy Azii: tr. III Vserossiyskoy nauch. konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water and Environmental Problems of Siberia and Central Asia: Proc. of the III All-Russian Scientific Conference with International Participation]. Barnaul, vol. 3, pp. 239-248. (In Russian).
17. Manzhina S.A., Dokuchaeva L.M., 2022. [Diagnostic indicators for assessing irrigated arable land and pasture degradation]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 2, pp. 101-122, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1281> [accessed 15.05.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-101-122>. (In Russian).
18. Kalinin A.Yu., Shadskikh V.A., Romanova L.G., Kizhaeva V.E., Peshkova V.O., 2016. *Rekomendatsii po otsenke ekologicheskoy situatsii agrotsenozov oroshayemykh zemel' i prilegayushchikh k nim territoriy* [Recommendations for Assessing the Ecological Situation of Agrocenoses of Irrigated Lands and Adjacent Territories]. Engels, Volzh. Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, 36 p. (In Russian).
19. Markin V.N., 2006. *Sravnienie metodov opredeleniya velichiny ekologicheskoi dopustimogo stoka rek* [Comparison of methods for determining the environmentally permissible river flow]. *Rol' prirodooobustroystva v obespechenii ustoychivogo funktsionirovaniya i razvitiya ekosistem: materialy mezhdunaridnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The Role of Environmental Management in Ensuring the Ecosystems' Sustainable Functioning and Development: Proc. of the International Scientific-Practical Conference]. Moscow, MGUP, pt. 2, pp. 126-132. (In Russian).



20. Orlova I.V., 2015. *Otsenka ekologicheski dopustimyykh iz"yatiy stoka malykh i srednikh rek dlya tseley orosheniya* [Assessment of environmentally acceptable runoff withdrawals in small and medium-sized rivers for irrigation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], no. 2, pt. 2, available: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22088> [accessed 02.06.2023]. (In Russian).

---

***Информация об авторе***

**И. В. Орлова** – научный сотрудник, кандидат географических наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Российская Федерация, [inna\\_orlova11@mail.ru](mailto:inna_orlova11@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7644-8763>.

***Information about the author***

**I. V. Orlova** – Researcher, Candidate of Geographic Sciences, Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russian Federation, [inna\\_orlova11@mail.ru](mailto:inna_orlova11@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7644-8763>.

*Автор несет ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.  
The author is responsible for violation of scientific publication ethics.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 13.07.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023;  
принята к публикации 15.09.2023.  
The article was submitted 13.07.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for  
publication 15.09.2023.*