

УДК [556.18:004.78]:556.555.8(282.247.415.53) doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725

Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами

Н.Н. Красногорская¹, Е.А. Белозерова²

¹ НПП ООО «Юнисол», Уфа

² Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России, Уфа, elena.belozerova.ufa@gmail.com

В статье изложена методика определения средневзвешенного геоэкологического риска загрязнения и истощения водных ресурсов для административно-территориальных единиц. Определены риски истощения и загрязнения водных объектов в 40 муниципальных образованиях, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы. На основании результатов расчета произведено зонирование муниципалитетов по величине средневзвешенного риска. Разработана система принятия решений по управлению водными ресурсами на основе анализа риска.

Настоящая методика основывается на концепции управления водными ресурсами на основе данных и может применяться к любому уровню административно-территориального деления (район, субъект, федеральные округ и др.).

Ключевые слова: риск, управление на основе данных, водные ресурсы, геоинформационная система.

Development of a geographic information system for decision making in water resources management

N.N. Krasnogorskaya¹, E.A. Belozerova²

¹ NPP Unisol LLC, Ufa, Russia

² Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

At the moment, fresh water is one of the most important strategic resources and the demand for it increases every year. Climate change, increase in the world population, rapid economic growth and irrational water use lead to water shortages. In this context, risk assessment of water resources depletion and pollution is particularly important. In order to effectively manage water resources, geographic information systems (GIS) are frequently used. These systems allow to combine data from different sources, in different formats (text, image, signals, etc.), analyzing and visualizing them in the form of charts and maps. This article proposes a methodology for assessing the risk of depletion and pollution of water bodies within the administrative-territorial division using GIS. When calculating water resources depletion risk several parameters are taken into account in particular: the watershed area (within the boundaries in the municipality territory), household water consumption (surface water and groundwater), data of land use, the average annual runoff, karst phenomena. The water resources pollution risk is determined by: criterion of specific combinatorial water pollution index and water pollution factor. The methodology has been tested for 40 municipalities located in the catchment area of the river Ufa. The municipalities under study were divided into several zones according to the value of the average weighted geoecological risk of water resources depletion and pollution. On the basis of the methodology, a decision-making support system for water management in municipalities has been developed. As a result of water resources

depletion and pollution risk assessment, a set of measures for more effective water management in the territory is proposed.

Keywords: risk, data-driven management, water resources, geographic information system.

For citation: *N.N. Krasnogorskaya, E.A. Belozeroва. Development of a geographic information system for decision making in water resources management. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydro-meteorology and Ecology. 2021, 65: 702—725. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725*

Введение

Пресная вода считается одним из самых ценных ресурсов на Земле, однако ее запасы уязвимы без адекватных стратегий управления. В отчете [1] сказано, что нагрузка на водные ресурсы увеличивается по мере роста спроса на них и обострения последствий изменения климата. В странах с высоким уровнем нагрузки на водные ресурсы в настоящее время проживают более 2 млрд человек. Свыше 4 млрд сталкиваются с серьезной нехваткой воды, как минимум 1 месяц в году. Глобальный средний дефицит воды — 11 %, однако в 31 стране мира дефицит воды составляет от 25 % (минимальный порог дефицита воды) до 70 %, а в 22 странах этот показатель превышает 70 %, что означает серьезный дефицит воды.

Для эффективного управления водными ресурсами все чаще применяются геоинформационные системы [2—5]. Так, в работе [6] приведен пример геоинформационной системы для управления водными ресурсами участка р. Арканзас (США) и показано, что внедрение ГИС позволяет сохранить качество поверхностных и подземных вод, спланировать количество воды, необходимое на сельскохозяйственные нужды и не допустить нарушения межрегиональных договоренностей по водопользованию.

В статье [7] излагаются проблемы муниципальных образований Канады при реализации стратегий охраны источников воды в провинции Квебек. Авторами предлагается внедрение программного обеспечения (ПО), которое может интегрировать данные о землепользовании с данными о качестве воды, предоставляемых несколькими организациями в различных форматах, не всегда совместимых между собой. ПО представляет собой гибкую программную платформу для сбора и обмена данными и их анализа в целях принятия управленческих решений.

Ученые из Индии используют ГИС как инструмент по оценке перераспределения водных ресурсов вследствие урбанизации на примере региона Хайдарабад [8]. В работах [9—12] предлагается управлять водными ресурсами и территориями с использованием данных дистанционного зондирования и космических снимков, собираемых в режиме реального времени, интегрированных в ГИС системы для целей сельского хозяйства и водоснабжения населенных пунктов, а также прогнозирования экстремальных ситуаций на водосборе.

Некоторые исследователи предлагают совмещать современные вычислительные технологии с геоинформационными системами. Например, в работе [13] рассматривается использование методов нечеткой логики и ГИС для определения качества подземных вод, выделения участков с водой, пригодной для

питьевого водоснабжения. В работе [14] авторами предлагается экспертная система принятия решений для управления водными ресурсами на основе облачных вычислений.

С помощью геоинформационных систем [15, 16] оценивается риск количественного и качественного истощения водных ресурсов для бассейнов исследуемых рек. Однако, в работах, посвященных тематике управления водными ресурсами и оценке риска возникновения экстремальных гидрологических ситуаций, часто применяется бассейновый подход, т. е. все характеристики рассчитываются для водосборной территории. Между тем, водосборные территории и административно-территориальные границы не всегда совпадают, вследствие чего это затрудняет принятие управленческих решений на уровне субъектов, районов, муниципальных образований и др.

При решении проблем рационального водопользования в рамках административно-территориального деления возникает целый ряд проблем методического и методологического характера:

— неопределенность критериев для оценки экологического состояния водных объектов;

— поливариантность взаимосвязей количественных и качественных характеристик водного объекта из-за региональных природных, антропогенных, климатических особенностей территории [17];

— отсутствие привязки гидрометеорологических данных к административно-территориальным единицам;

— отсутствие системного подхода в сборе и обработке данных, проблемы совместимости баз данных, формируемые различными организациями и ведомствами [18, 19].

Таким образом, ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными уровнями территориального планирования (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки, т. е. различными форматами и разрешением данных.

В настоящей статье предложена методика оценки риска истощения и загрязнения водных объектов в рамках административно-территориального деления с использованием геоинформационных систем. На основе этой методики разработана система поддержки принятия решения при управлении водными ресурсами. Для апробации методики выбрана территория водосборного бассейна р. Уфы и муниципальные образования, расположенные на этой территории.

Цель настоящего исследования заключается в формировании системы поддержки принятия решений (методической основы), определение источников данных, получение результатов оценки рисков истощения и загрязнения территорий муниципальных образований.

Исходные данные

Для разработки геоинформационной системы поддержки принятия решений выбран водосборный бассейн р. Уфы. Уфа — река III порядка Волжского бассейна, водосборная площадь которой располагается в пределах четырех субъектов

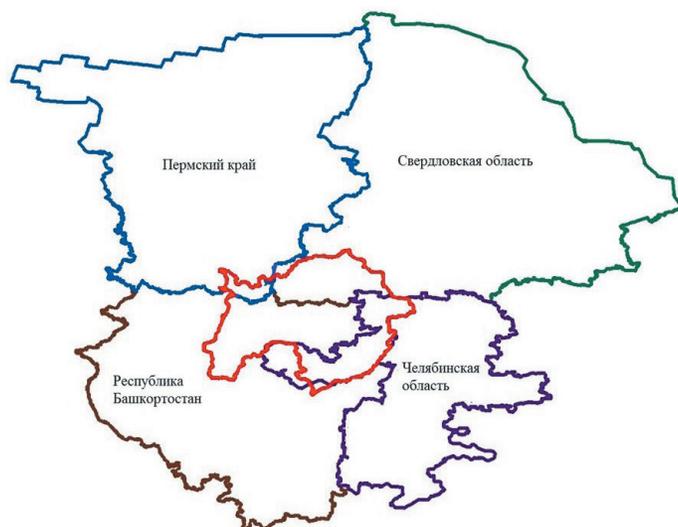


Рис. 1. Расположение водосборного бассейна р. Уфы.

Fig. 1. The river Ufa catchment area location.

РФ: Пермского края, Свердловской, Челябинской областей и Республики Башкортостан (РБ); самый крупный правосторонний приток р. Белой (рис. 1). Гидрографическая сеть бассейна р. Уфы насчитывает более 5000 водотоков разной длины [20].

Территория водосборного бассейна р. Уфы подразделяется на 25 водосборных бассейнов (табл. 1).

Таблица 1

Обозначение водосборов бассейна р. Уфы и координаты их устьев [21]

Designation of the River Ufa basin catchments and coordinates of their mouths [21]

№	Название поста	Условное обозначение	Период наблюдения	Координаты устья	
				с.ш.	в.д.
1	р. Уфа — г. Нязепетровск	UN	1963—1987	56,02	59,57
2	р. Уфа — г. Михайловск	UM	1966—1969, 1971, 1974— 1987	56,41	59,09
3	р. Уфа — г. Красноуфимск	UK	1963—1987	56,61	57,79
4	р. Уфа — с. Верхний Суян	UV	1966—1987	56,04	57,27
5	р. Уфа — Павловская ГЭС, нижний бьеф	UP	1963—1987	55,40	56,54
6	р. Ай — с. Веселовка	AV	1966—1987	54,96	59,54
7	р. Ай — с. Метели	AM	1963—1987	56,02	57,94
8	р. Ай — г. Злагоуст	AZ	1963—1979	55,19	59,62
9	р. Ай — с. Лаклы	AL	1963—1987	55,20	58,55
10	р. Юрюзань — пгт. Вязовая	JV	1966—1987	54,90	58,34

Окончание табл. 1

№	Название поста	Условное обозначение	Период наблюдения	Координаты устья	
				с.ш.	в.д.
11	р. Юрюзань — д. Чулпан	JC	1963—1987	55,29	58,12
12	р. Юрюзань — пос. Агняш	JA	1963—1987	55,58	57,22
13	р. Юрюзань — с. Екатериновка	JE	1963—1979, 1982	54,74	58,51
14	р. Юрюзань — ж. д ст. Юрюзань	JJ	1966—1974	54,45	58,44
15	р. Бисерть — с. Гайны	BG	1963—1987	56,72	58,03
16	р. Тесьма — г. Златоуст	TZ	1963—1987	55,19	59,72
17	р. Куса — пгт Магнитка	KM	1965—1987	55,34	59,68
18	р. Большая Арша — д. Вознесенская	BA	1963—1987	55,54	59,63
19	р. Тюй — д. Гумбино	TG	1963—1987	55,99	57,04
20	р. Сарс — с. Султанбеково	SS	1963—1987	56,04	57,14
21	р. Тюлюк — с. Тюлюк	TT	1965—1987	54,62	58,77
22	р. Яманелга — выше ист. Тюба (Устье)	YE	1971—1986	55,43	56,62
23	р. Киги — д. Кондаковка	KK	1980—1987	55,60	58,48
24	р. Большой Ик — д. Таишево	VI	1963—1987	55,76	58,44
25	р. Катав — п. Верхний Катав	VK	1966—1987	54,62	58,29

На территории водосборного бассейна р. Уфы расположены 40 муниципальных образований (табл. 2).

Таблица 2

Перечень муниципальных образований,
расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы [22, 23]
The list of municipalities located in the river Ufa catchment area [22, 23]

№	Название муниципального образования	Площадь*, км ²	Плотность населения, чел/ км ²
<i>Пермский край</i>			
1	Чернушинский р-н	318	30,03
2	Октябрьский р-н	1909	7,81
<i>Челябинская обл.</i>			
3	Ашинский р-н	328	20,58
4	Катав-Ивановский р-н	2032	8,44
5	Саткинский р-н	650	32,54
6	Нязепетровский р-н	468	4,63
7	Кусинский р-н	1473	17,24
8	Златоустовский городской округ (ГО)	1706	87,59
9	Верхнеуфалейский ГО	1259	18,83
10	Карабашский ГО	215	16,07
11	Кыштымский ГО	204	50,80
12	Каслинский р-н	106	11,10
13	Усть-Катавский ГО	51	36,58
14	Трехгорный ГО	163	200,40

Окончание табл. 2

№	Название муниципального образования	Площадь*, км ²	Плотность населения, чел/ км ²
<i>Респ. Башкортостан</i>			
15	Уфимский р-н	253	54,86
16	Бирский р-н	15	36,40
17	Мишкинский р-н	168	13,87
18	Балтачевский р-н	24	11,88
19	Благовещенский р-н	1865	21,86
20	ГО Уфа	392	1586,06
21	Иглинский р-н	984	24,75
22	Аскинский р-н	1958	7,42
23	Нуримановский р-н	128	8,10
24	Караидельский р-н	763	6,74
25	Салаватский р-н	870	11,09
26	Белорецкий р-н	506	9,00
27	Дуванский р-н	65	9,54
28	Мечетлинский р-н	1561	14,76
29	Кигинский р-н	1607	10,21
30	Белокатайский р-н	2748	6,05
31	Учалинский р-н	64	15,82
<i>Свердловская обл.</i>			
32	Красноуфимский ГО	2684	7,40
33	Ачитский ГО	1646	7,46
34	Шалинский ГО	105	3,99
35	Аргинский ГО	2779	9,84
36	Нижнесергинский р-н	3543	10,65
37	Бисертский ГО	1232	7,69
38	ГО Первоуральск	59	69,65
39	ГО Ревда	102	57,10
40	Полевской ГО	126	44,23

* Указана площадь муниципального образования, расположенного в границах водосборной территории р. Уфы

Карта-схема водосборов и административно-территориального деления водосборного бассейна р. Уфы представлена на рис. 2.

Как видно из рисунков 1 и 2, границы водосборов и муниципальных образований не совпадают. Одна административно-территориальная единица может быть расположена на территории нескольких водосборов.

В настоящей работе в качестве входных данных использованы: гидрологические показатели водотоков, геоинформационные данные, относящихся к водосборному бассейну р. Уфы, а также демографические данные.

Гидрологические показатели: по 25 створам, расположенным в пределах водосборной территории р. Уфа. Период исследования: 1963—1987 гг.

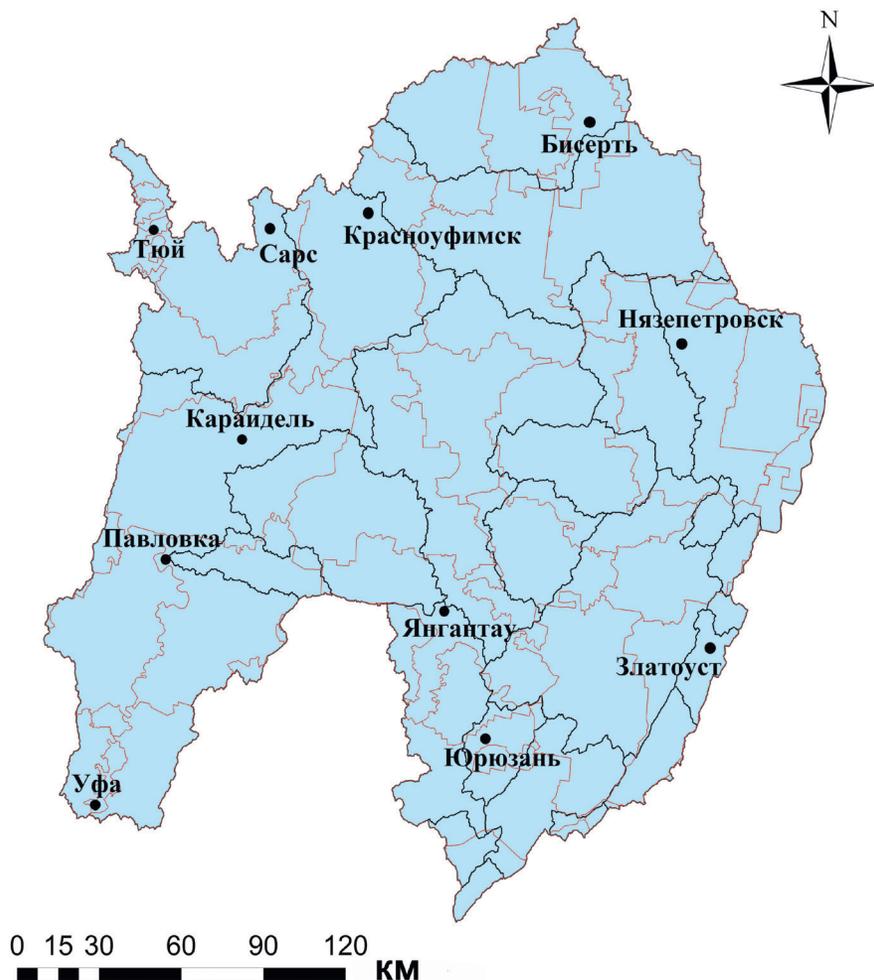


Рис. 2. Карта схема водосборного бассейна р. Уфы:
красные линии — административно-территориальные границы;
черные линии — границы водосборных бассейнов.

Fig. 2. Schematic map of the river Ufa catchment:
red lines — administrative and territorial boundaries; black lines — catchment area boundaries.

Проанализировано более 197 000 ежедневных данных о расходе, опубликованных в Гидрологических ежегодниках Уральского управления гидрометеорологической службы [24].

Геоинформационные данные: геоинформационные карты геологического строения; топографические карты исследуемой территории; цифровая модель рельефа (ЦМР).

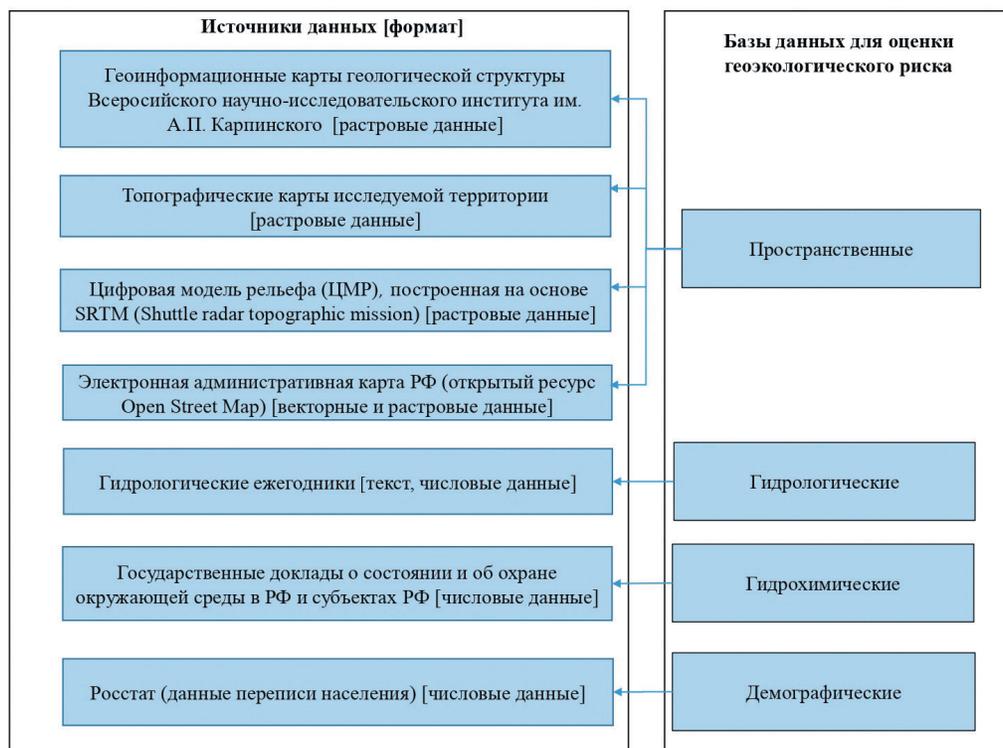


Рис. 3. Исходные данные для построения геоинформационной системы управления рисками загрязнения и истощения на водосборе р. Уфы.

Fig. 3. Initial data for a geographic information system for pollution and depletion risk management of the river Ufa catchment.

Демографические данные: население субъектов РФ, в которых расположен водосборный бассейн р. Уфа на 1 января 2020 г. [22].

На рис. 3 представлена систематизация исходной информации и ее распределение по базам данных. В качестве программного обеспечения для обработки и визуализации геоданных используются программы ArcGIS 10.1 и QGIS.

Методика определения риска истощения и загрязнения

В настоящей работе расчет геоэкологического риска истощения и загрязнения водных ресурсов основывается на способе определению риска длительного (хронического) воздействия, разработанного Международным институтом оценки риска здоровью (А.В. Киселев, К.Б. Фридман) [15]. Данный подход к расчету риска адаптирован к отечественным нормативам и применим для различных составляющих окружающей среды (воздух, питьевая вода и т.д.). Оценка риска основана на линейно-экспоненциальной (1) и пороговой (2) математических моделях.

1. Линейно-экспоненциальная математическая модель:

$$Risk = 1 - \exp\left\{-Unit_{Risk} C^B t\right\}, \quad (1)$$

где $Risk$ — потенциальный риск; $Unit_Risk$ — единица риска, определяемая как фактор пропорции роста риска в зависимости от величины действующей концентрации (дозы); C — реальная концентрация (или доза) вещества, оказывающая воздействие за время t ; B — коэффициент, учитывающий особенности токсических свойств вещества.

2. Пороговая модель:

$$Risk = H(C - C_m), \quad (2)$$

где H — функция Хевисайда, $H(x) = 0$ при $x < 0$ и $H(x) = 1$ $x > 0$; C_m — пороговая концентрация.

Уравнение расчета потенциального риска наступления хронических эффектов (3):

$$Risk = 1 - \exp\left\{I_n(0,84) / \left(\frac{ПДК}{K_3}\right) / LADD\right\}, \quad (3)$$

где ПДК определяется как отношение минимальных пороговых концентраций загрязняющих веществ, вызывающих достоверный эффект токсического действия (C_{lim}) и коэффициента запаса ($K_{зап}$), принимаемый равным 100 для веществ с выраженной вероятностью отдаленных последствий и 10 для остальных веществ; K_3 — коэффициент загрязнения; $LADD$ (Lifetime Average Daily Dose) приравнивается к среднесуточной дозе за ожидаемую продолжительность жизни (ССДЖ). ССДЖ отражает различия между продолжительностью периода воздействия и сроком жизни человека, подвергающегося этому воздействию.

На основе работ [15—17] и с учетом моделей, описанных выше, риск загрязнения определялся по формуле:

$$Risk_{загр} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot \text{УКИЗВ} \cdot K_3 \cdot K_{зап}\right\}, \quad (4)$$

где УКИЗВ — удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков [16], который предусматривает оценку качества воды по концентрациям более широкого спектра загрязняющих веществ и степени загрязненности воды; $K_{зап}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 10.

Риск истощения водных ресурсов определяется по формуле:

$$Risk_{ист} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot K_{ист} \cdot K_{п}\right\}, \quad (5)$$

где $K_{ист}$ — коэффициент истощения водных ресурсов, определяется как

$$K_{ист} = \frac{V_{пов} + V_{под}}{Q_{год ст} \cdot S_{ВДС} \cdot K_{исп}}, \quad (6)$$

где $V_{пов}$ — водоотбор поверхностных вод, тыс. м³/км²; $V_{под}$ — водоотбор подземных вод, тыс. м³/км²; $Q_{год ст}$ — среднемноголетний расход годового стока, м³/с; $S_{ВДС}$ — действующая площадь водосборов, км²; $K_{исп}$ определяется в зависимости

от геологической структуры поверхности. Поправочный коэффициент геологической структуры поверхности, содержащей карстовые осадочные породы, принимается как 1,5; не содержащей данный тип геологических пород — 1.

Средневзвешенный геоэкологический риск рассчитывается по формуле:

$$Risk_{cp} = 1 - \exp\left\{\frac{1}{2}\left[\ln(1 - Risk_{ист}) + \ln(1 - Risk_{загр})\right]\right\}, \quad (7)$$

где $Risk_{ист}$, $Risk_{загр}$ — показатели риска истощения и загрязнения, соответственно.

Ранжирование риска происходит в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Ранжирование значений риска
Risk values ranking

Величина средневзвешенного риска $Risk_{cp}$	Характеристика риска
0,00—0,25	Слабая
0,25—0,50	Средняя
0,50—0,75	Сильная
0,75—1,00	Очень сильная

Методика определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц

Для определения риска истощения и загрязнения водных объектов на территории административно-территориальных единиц изложенная выше методика нуждается в преобразовании. В частности, все параметры, учитываемые в методике, пересчитываются на масштаб исследуемой административно-территориальной единицы (район, область, округ и др.). В настоящем исследовании расчет осуществляется для муниципальных образований, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы. Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц приведен в табл. 4.

Таблица 4

Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц

The list of changes in the methodology for determining the depletion and pollution risk of water bodies inside the administrative and territorial units

Обозначение параметра	Источник	Адаптация для муниципальных образований
$V_{пов}$ и $V_{под}$	Росстат: «Численность населения РФ по муниципальным образованиям на 1 января 2020 г.». [22] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды РФ». [25] Данные по бытовому водопотреблению на душу населения.	Определение населения в каждом исследуемом муниципальном образовании (МО). По данным структуры водопользования, определение объемов бытового водопотребления для каждого МО (произведение объема душевого бытового водопотребления и количества человек, проживающих на территории каждого МО).

Обозначение параметра	Источник	Адаптация для муниципальных образований
$S_{\text{вдс}}$	Электронные карты [26]: карта водосборных бассейнов; административно-территориальная карта.	Определение площади каждого водосборного бассейна, находящаяся на территории МО (т. к. административно-территориальные границы и границы водосборов зачастую не совпадают, то МО может включать в себя несколько частей площадей водосборных бассейнов).
$Q_{\text{год ст}}$	Гидрологический ежегодник Уральского и Башкирского отделений Гидрометцентра; данные о расходах воды в реках на исследуемой территории. [24]	Определение среднего многолетнего значения расхода воды для каждого исследуемого водосбора. Определение модуля стока M для каждого водосборного бассейна (отношение расхода воды в реке к площади водосбора). Определение годового стока каждого МО, как суммы произведений модуля стока каждого конкретного бассейна на площадь доли этого бассейна, принадлежащего каждому МО.
$K_{\text{исп}}$	Карты геологического строения Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского. [27]	Определяется по геологическим картам. Для каждого МО поправочный коэффициент $K_{\text{исп}}$ определяется в зависимости от геологической структуры большей части поверхности.
$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}}$ зависит от $K_{\text{исп}}$. Значение поправочного коэффициента в зависимости от коэффициента истощения. [17]	См. данные в табл. 4.1.
УКИЗВ	Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2011—2019 гг. [28] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2017—2019 гг. [29] Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2007—2016 гг. [29] Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» 2000—2018 гг. [30] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2010—2019 гг. [31]	По данным докладов о состоянии окружающей среды определяются средне-многолетние значения УКИЗВ. Значения УКИЗВ интерполируются на территории водосборного бассейна. По полученной интерполяции определяются среднее многолетнее значение УКИЗВ для каждого МО.
$K_{\text{зап}}$	Коэффициент запаса, принимаемый равным 10 [17].	
$K_{\text{з}}$	Коэффициент загрязнения зависит от значений УКИЗВ [17]	См. данные в табл. 4.2.

Таблица 4.1

$K_{ист}$	$K_{п}$
0,1—0,5	0,5
0,5—1,0	1,0
1,0—1,5	1,5
1,5—2,0	2,0
2,0—2,5	2,5

Таблица 4.2

УКИЗВ	Характеристика	K_3
0,2—1,0	очень чистые, чистые	0,5
1,0—4,0	умеренно загрязненные, загрязненные	1,0
4,0—10,0	грязные, очень грязные	1,5
> 10,0	чрезвычайно грязные	2,0

Определение риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы

Водопотребление для каждого муниципального образования, расположенного на водосборной территории р. Уфы определяется на основе государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». Для каждого субъекта РФ этот показатель разный. Для примера на рис. 4 в виде графика приведена структура водопотребления Республики Башкортостан в период 2010—2018 гг.

Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы сведены в табл. 5.

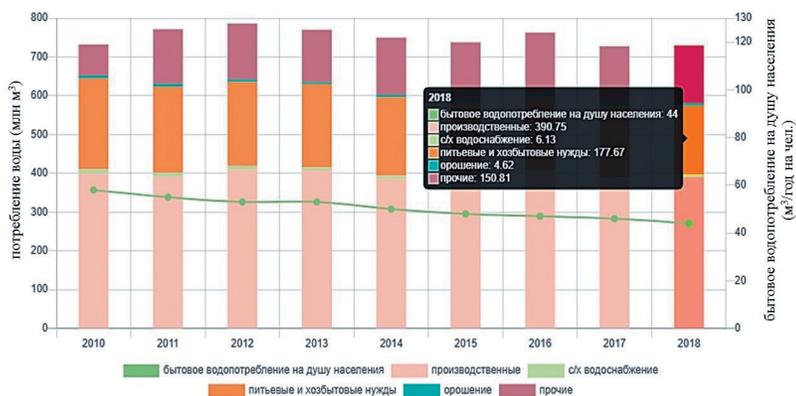


Рис. 4. Структура водопользования в Республике Башкортостан 2010—2018 гг. [25].

Fig. 4. Structure of water use in the Republic of Bashkortostan 2010—2018 [25].

Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований (МО) на территории водосборного бассейна р. Уфы
The results of the water bodies depletion risk calculated for municipalities in the river Ufa catchment area

№	Название муниципального округа	Q_{MO} м ³ /сек	Водопотребление на душу населения, тыс. м ³ /км ² /чел.	Водопотребление МО, тыс. м ³ /км ²	$K_{исп}$	$K_{ист}$	$K_{п}$	$Risk_{ист}$
<i>Пермский край</i>								
1	Чернушинский р-н	1,78	45	429729,30	1,5	0,51	0,5	0,0431
2	Октябрьский р-н	11,25	45	701142,75	1,5	0,02	0,5	0,0018
<i>Челябинская обл.</i>								
3	Ашинский р-н	3,77	59	398264,16	1,0	0,32	0,5	0,0277
4	Кагав-Ивановский р-н	23,37	59	1011854,72	1,0	0,02	0,5	0,0019
5	Саткинский р-н	18,51	59	4611503,72	1,5	0,07	0,5	0,0060
6	Нязепетровский р-н	21,87	59	948173,07	1,0	0,01	0,5	0,0011
7	Кусинский р-н	9,66	59	1551169,00	1,5	0,07	0,5	0,0061
8	Златоустовский ГО	13,65	59	8816283,86	1,0	0,38	0,5	0,0325
9	Верхнеуфалейский ГО	9,19	59	1398711,23	1,5	0,08	0,5	0,0070
10	Карабашский ГО	1,57	59	203847,95	1,5	0,40	0,5	0,0345
11	Кыштымский ГО	1,49	59	611428,80	1,5	1,34	1,5	0,2960
12	Каслинский р-н	0,77	59	69419,40	1,5	0,56	0,5	0,0480
13	Усть-Катавский ГО	7,57	59	1454640,28	1,0	0,29	0,5	0,0245
14	Трехгорный ГО	1,87	59	1927246,80	1,0	6,31	2,5	0,9360
<i>Респ. Башкортостан</i>								
15	Уфимский р-н	1,91	44	610701,52	1,5	0,84	1,0	0,1366
16	Бирский р-н	0,11	44	24024,00	1,5	9,43	2,5	0,9836
17	Мишкинский р-н	1,27	44	102527,04	1,5	0,32	0,5	0,0276
18	Балтачевский р-н	0,18	44	12545,28	1,5	1,92	2,0	0,4886
19	Благовещенский р-н	14,08	44	1793831,60	1,5	0,05	0,5	0,0040
20	ГО Уфа	2,96	44	27356362,88	1,5	15,72	2,5	0,9989
21	Иглинский р-н	7,43	44	1071576,00	1,5	0,10	0,5	0,0085
22	Аскинский р-н	14,78	44	639247,84	1,5	0,01	0,5	0,0013
23	Нуримановский р-н	15,54	44	919155,60	1,5	0,02	0,5	0,0013
24	Караидельский р-н	27,59	44	1088078,64	1,5	0,01	0,5	0,0006
25	Салаватский р-н	15,87	44	1057897,28	1,0	0,03	0,5	0,0027
26	Белорецкий р-н	5,82	44	200376,00	1,0	0,07	0,5	0,0059
27	Дуванский р-н	22,79	44	1360861,92	1,5	0,01	0,5	0,0011
28	Мечетлинский р-н	9,83	44	1013775,84	1,5	0,04	0,5	0,0038
29	Кигинский р-н	10,12	44	721928,68	1,0	0,04	0,5	0,0039
30	Белокатайский р-н	20,03	44	833472,20	1,0	0,01	0,5	0,0012
31	Учалинский р-н	1,28	44	44549,12	1,0	0,54	1,0	0,0905
<i>Свердловская обл.</i>								
32	Красноуфимский ГО	17,45	73	1449896,80	1,5	0,02	0,5	0,0018

Окончание табл. 5

№	Название муниципального округа	$Q_{\text{МО}}$ м ³ /сек	Водопотребление на душу населения, тыс. м ³ /км ² /чел.	Водопотребление МО, тыс. м ³ /км ²	$K_{\text{исп}}$	$K_{\text{ист}}$	$K_{\text{п}}$	$Risk_{\text{ист}}$
33	Ачитский ГО	11,69	73	896378,68	1,5	0,03	0,5	0,0027
34	Шалинский ГО	0,75	73	30583,35	1,0	0,39	0,5	0,0335
35	Артинский ГО	18,06	73	1996211,28	1,5	0,03	0,5	0,0023
36	Нижнесергинский р-н	25,16	73	2754505,35	1,5	0,02	0,5	0,0018
37	Бисертский ГО	8,75	73	691607,84	1,5	0,04	0,5	0,0037
38	ГО Первоуральск	0,42	73	299982,55	1,5	8,09	2,5	0,9706
39	ГО Ревда	0,72	73	425166,60	1,5	3,84	2,5	0,8122
40	Полевской ГО	0,79	73	406827,54	1,5	2,71	2,5	0,6933

Определение риска загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

Одним из коэффициентов, необходимых для определения риска загрязнения, является УКИЗВ, в настоящем исследовании — удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков (данные получены из УКИЗВ) определяется по средним многолетним данным ежегодных государственных докладов о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан, Пермского края, Челябинской и Свердловской областей [28—31].

Так как качество воды определяется в ограниченном количестве створов, данные УКИЗВ интерполированы на водосборную территорию р. Уфы (рис. 5).

По результатам интерполяции данных УКИЗВ определяются средние значения этого показателя для каждого муниципального образования.

Расчет средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

Результаты расчета средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов, расположенных на территории муниципальных образований в границах водосборного бассейна р. Уфы, приведены в табл. 6 и графически интерпретированы на рис. 6.

Величина средневзвешенного геоэкологического риска определялась путем ранжирования значения средневзвешенного риска согласно данным табл. 3. По рис. 6 видно, что большинство муниципальных образований водосборного бассейна относится к территориям с сильным и очень сильным риском истощения и загрязнения. В связи с этим принятие решений по управлению водными ресурсами основывается на анализе рисков истощения, загрязнения и средневзвешенного геоэкологического риска.

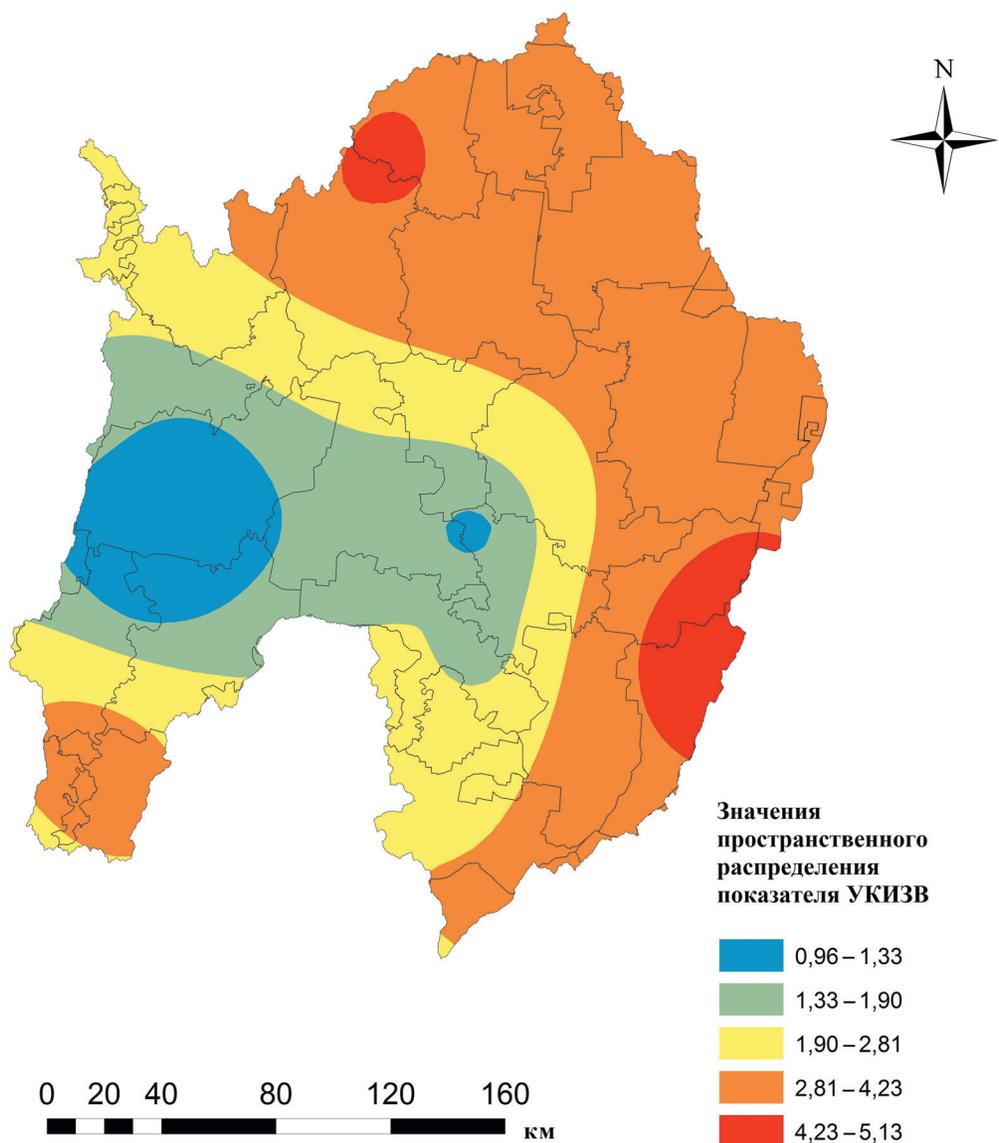


Рис. 5. Схема пространственного распределения показателя УКИЗВ по муниципальным образованиям, расположенным на территории водосборного бассейна р. Уфы.

Fig. 5. Scheme of the SCIWP spatial distribution by the municipalities located in the river Ufa catchment area.

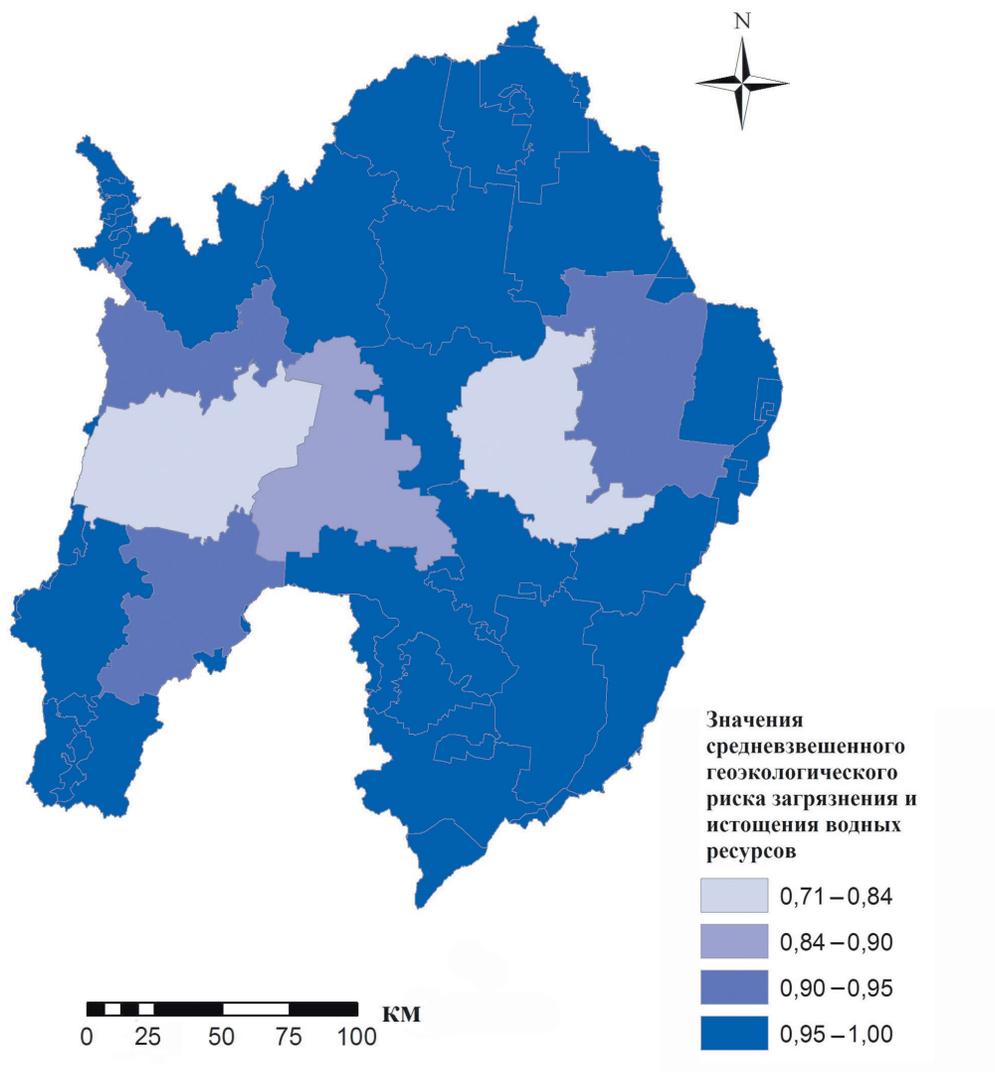


Рис. 6. Пространственное распределение средневзвешенного геоэкологического риска и загрязнения водных ресурсов муниципальных образований, расположенных на территории водосбора р. Уфы.

Fig. 6. Spatial distribution of the average weighted geoecological risk of water resources depletion and pollution for municipalities located in the river Ufa catchment area.

Результаты расчета риска истощения и загрязнения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы

The results of the water bodies depletion and pollution risk calculations of municipalities in the river Ufa catchment area

№	Название муниципального округа	УКИЗВ	K_3	$Risk_{зар}$	$Risk_{cp}$
<i>Пермский край</i>					
1	Чернушинский р-н	2,48	1,0	0,9868	0,89
2	Октябрьский р-н	2,45	1,0	0,9860	0,88
<i>Челябинская обл.</i>					
3	Ашинский р-н	2,10	1,0	0,9743	0,84
4	Катав-Ивановский р-н	2,60	1,0	0,9893	0,90
5	Саткинский р-н	3,40	1,0	0,9973	0,95
6	Нязепетровский р-н	3,60	1,0	0,9981	0,96
7	Кусинский р-н	4,40	1,5	0,9999	1,00
8	Златоустовский ГО	4,55	1,5	0,9999	1,00
9	Верхнеуфалейский ГО	3,77	1,0	0,9986	0,96
10	Карабашский ГО	4,10	1,5	0,9999	1,00
11	Кыштымский ГО	3,90	1,0	0,9988	0,97
12	Каслинский р-н	3,88	1,0	0,9988	0,97
13	Усть-Катавский ГО	2,13	1,0	0,9756	0,85
14	Трехгорный ГО	2,62	1,0	0,9896	0,97
<i>Респ. Башкортостан</i>					
15	Уфимский р-н	3,28	1,0	0,9967	0,95
16	Бирский р-н	2,05	1,0	0,9719	0,98
17	Мишкинский р-н	1,43	1,0	0,9173	0,72
18	Балтачевский р-н	1,38	1,0	0,9098	0,79
19	Благовещенский р-н	1,75	1,0	0,9527	0,78
20	ГО Уфа	3,40	1,0	0,9973	1,00
21	Иглинский р-н	3,20	1,0	0,9962	0,94
22	Аскинский р-н	1,67	1,0	0,9456	0,77
23	Нуримановский р-н	1,42	1,0	0,9159	0,71
24	Караидельский р-н	0,99	0,5	0,5781	0,35
25	Салаватский р-н	1,83	1,0	0,9589	0,80
26	Белорецкий р-н	3,10	1,0	0,9955	0,93
27	Дуванский р-н	1,58	1,0	0,9364	0,75
28	Мечетлинский р-н	2,10	1,0	0,9743	0,84
29	Кигинский р-н	2,00	1,0	0,9694	0,83
30	Белокатайский р-н	2,80	1,0	0,9924	0,91
31	Учалинский р-н	3,30	1,0	0,9968	0,95
<i>Свердловская обл.</i>					
32	Красноуфимский ГО	3,60	1,0	0,9981	0,96
33	Ачитский ГО	4,20	1,5	0,9999	1,00

№	Название муниципального округа	УКИЗВ	K_3	$Risk_{заг}$	$Risk_{ср}$
34	Шалинский ГО	4,16	1,5	0,9999	1,00
35	Артинский ГО	3,75	1,0	0,9986	0,96
36	Нижнесергинский р-н	3,90	1,0	0,9989	0,97
37	Бисертский ГО	4,05	1,5	0,9999	0,99
38	ГО Первоуральск	4,10	1,5	0,9999	1,00
39	ГО Ревда	3,80	1,0	0,9987	0,98
40	Полевской ГО	3,81	1,0	0,9987	0,98

Система поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами

Управленческие решения рекомендуется принимать исходя из значений средневзвешенного геоэкологического риска, а также рисков истощения, загрязнения. Алгоритм принятия решений представлен в виде схемы на рис. 7 и состоит из нескольких этапов.

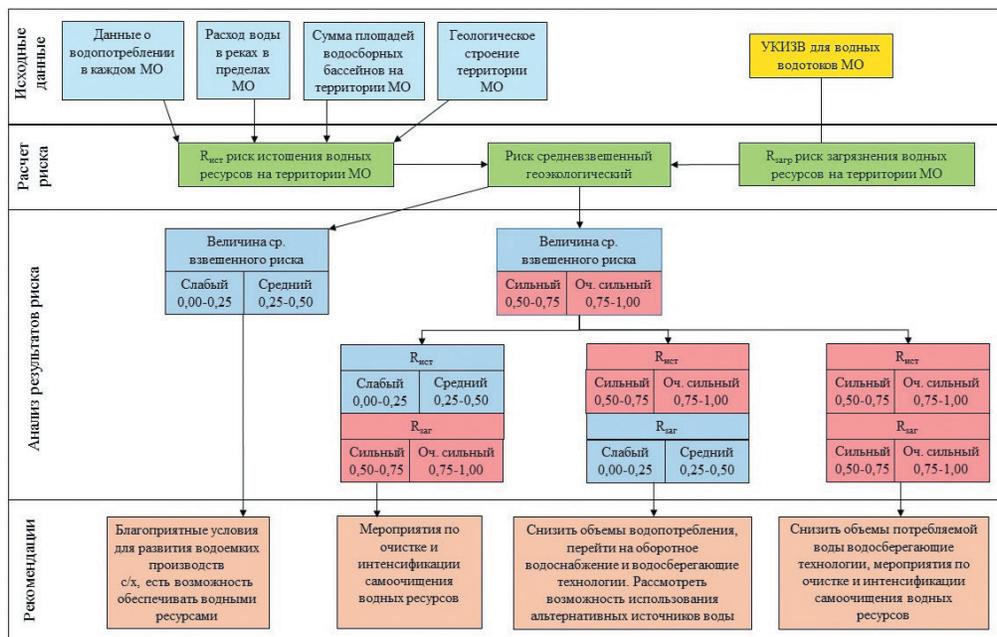


Рис. 7. Схема алгоритма принятия управленческих решений на основе анализа риска загрязнения и истощения водосборной территории.

Fig. 7. Scheme of the decision making algorithm based on the analysis of the catchment area pollution and depletion risk.

1. Сбор исходных данных для муниципальных образований. В качестве исходных данных используются:

- данные о водопотреблении в каждом;
- расход воды в реках в пределах муниципальных образований;
- сумма площадей водосборных бассейнов на территории;
- геологическое строение территории;
- УКИЗВ для водных объектов.

2. На втором этапе происходит расчет рисков загрязнения, истощения и средневзвешенного геоэкологического риска водных объектов на территории муниципальных образований согласно формулам (4)—(7).

3. На третьем этапе происходит анализ результатов расчета рисков. На основе совокупности полученных результатов формируются рекомендации.

4. Заключительный этап алгоритма — рекомендации. Как видно из рис. 7, если средневзвешенный геоэкологический риск характеризуется как слабый или средний, то рассматриваемая территория муниципального образования может быть пригодна для применения водоемких технологий и транспортировки водных ресурсов в соседние муниципалитеты.

Если средневзвешенный геоэкологический риск для одного из муниципальных образований характеризуется как сильный или очень сильный, то следует рассмотреть в отдельности риски истощения и загрязнения в данном муниципальном образовании. В случае, когда риск истощения слабый или средний, а уровень риска загрязнения определяется как сильный или очень сильный, то для данного муниципального образования необходимы мероприятия по очистке воды и интенсификации процессов самоочищения. В случае антибатного изменения рисков, т. е. риск истощения превышает риск загрязнения, рекомендуется снизить объемы водопотребления и перейти на водосберегающие технологии.

Если оба оцениваемых риска характеризуются как сильные или очень сильные — то рекомендуется снизить объемы водопотребления, применить водоочистные системы и реализовать мероприятия по интенсификации самоочищения, а также рассмотреть возможность использования альтернативных путей водоснабжения.

Заключение

В настоящем исследовании установлено, что ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными подходами к планированию территории (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки, т. е. различными форматами и разрешением данных.

В этой связи для обеспечения единого подхода к оценке водных ресурсов разработана геоинформационная система для определения геоэкологического риска на водосборной территории, основанная на обработке разнородных пространственных данных в границах административно-территориального деления. Представлен алгоритм поддержки принятия решений при управлении водными

ресурсами на территории муниципального образования, включающий в себя определение рисков истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц. Показано, что по результатам оценки риска истощения и загрязнения водных ресурсов предлагается комплекс мероприятий по более эффективному управлению водными ресурсами на территории.

Приведены результаты расчета геоэкологического риска загрязнения и истощения поверхностных водных ресурсов для каждого из 40 районов расположенного на территории водосборного бассейна р. Уфы. Установлено, что минимальный риск отмечается в Караидельском районе (РБ) — 0,35, максимальный — 0,99 — сразу для 8 районов Челябинской и Свердловской областей.

Установлено, что высокие показатели рисков истощения и загрязнения говорят о необходимости сокращения объемов потребления воды и интенсификации водоочистных мероприятий на этих территориях (включая возможность альтернативного водоснабжения). Все остальные исследуемые муниципальные образования характеризуются значениями слабого и среднего риска истощения, сильного и очень сильного риска загрязнения. В качестве рекомендуемых мероприятий могут быть предложены: сокращение объема сбросов, очистка водных объектов, интенсификация самоочищения водных ресурсов.

Важно отметить, что разработанная система отвечает требованию постоянного обновления и дополнения входных данных, что становится важным в условиях современных климатических изменений.

Список литературы

1. Деревяго И.П., Дубенко С.А. Экономические инструменты управления водными ресурсами и объектами и водохозяйственными системами в Республике Беларусь: тематические материалы проекта «Водная инициатива ЕС плюс для Восточного партнерства». Минск: БГТУ, 2019. 304 с.
2. Колбанёв М.О., Палкин И.И., Татарникова Т.М. Вызовы цифровой экономики // Ученые записки РГГМУ. 2020. № 58. С. 156—167. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-156-167.
3. Strager M.P., Fletcher J.J., Strager J.M., Yuill C. Watershed analysis with GIS: the watershed characterization and modeling system software application // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36, Issue 7. P. 970—976. doi: 10.1016/j.cageo.2010.01.003.
4. Hewett C.J., Doyle M.A., Quinn P.F. Hydroinformatics framework to aid decision-making for catchment management // Journal of Hydroinformatics. 2010. Vol. 12(2). P. 119—139. doi: 10.2166/hydro.2009.022.
5. Rong Y. Practical environmental statistics and data analysis. ILM publications, 2011. 269 p.
6. Rohmat F.I.W., Gates T.K., Labadie J.W. Enabling improved water and environmental management in an irrigated river basin using multi-agent optimization of reservoir operations // Environmental modelling and software. 2021. Vol. 135, 104909. P. 1—13. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104909.
7. Cyr-Gagnon J., Rodriguez M.J. Optimizing data management for municipal source water protection // Land use policy. 2021. Vol. 100, 103788. P. 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.12.035.
8. Nayan N.K., Das A., Mukerji A., Mazumder T., Bera S. Spatio-temporal dynamics of water resources of Hyderabad Metropolitan Area and its relationship with urbanization // Land Use Policy. 2020. Vol. 99, 105010. P. 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105010.
9. Isnain Z., Ghaffar S.N.A. Using the geographical information system (GIS) and remote sensing techniques for mapping the groundwater potential zones in Kg Timbang Dayang, Kota Belud, Sabah // Water Conservation And Management. 2020. Vol. 4(1). P. 57—60. doi: 10.26480/wcm.01.2020.57.60.
10. Abbas M.R., Hason M.M., Ahmad B.B., Rasib A.W.B., Abbas T.R. Variations size investigation in vegetation and surface waterbody for Central Part of Iraq using satellite imagery bands // 2nd International

- Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 928. P. 1—12. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022064.
11. *Ротанова И.Н.* Геоинформационные методы и системы в управлении регионом (на материалах проектов конкурса «РФФИ—СИБИРЬ» (Алтайский край)) // Вестник российского фонда фундаментальных исследований. 2018. № 4 (100). С. 62—66. doi: 10.22204/2410-4639-2018-100-04-62-66.
 12. *Yousaf W., Awan W.K., Kamran M., Ahmad S.R.* A paradigm of GIS and remote sensing for crop water deficit assessment in near real time to improve irrigation distribution plan // *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 234, 106443. P. 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106443>.
 13. *Mallik S., Mishra U., Paul N.* Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic // *Ecological indicators*. 2021. Vol. 121. P. 1—10. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107179.
 14. *Li N.* Early warning expert decision system of water resource management based on Cloud Computing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1648. P. 1—5. doi: 10.1088/1742-6596/1648/4/042096.
 15. *Щербинина С.В.* Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов для уточнения комплекса водоохраных мероприятий (на примере Воронежской области): дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2006. 154 с.
 16. *Nafikova E., Elizaryev A., Ismagilov A., Dorosh I., Khaidarshin A., Alexandrov D.* Assessment of geoeological conditions and the depletion risk of the river Belaya catchment area // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. P. 1—8. doi: 10.1051/e3sconf/202015702003.
 17. *Красногорская, Н.Н., Нафикова Э.В.* Геоэкологическая оценка и прогнозирование опасных природно-техногенных процессов на водосборе реки. Уфа: Инновационное машиностроение, 2015. 242 с.
 18. *Kebo S., Bunch M.J.* Canadian ENGOs in governance of water resources: information needs and monitoring practices// *Environmental monitoring and assessment*. 2013. Vol. 185 (11). P. 9451—9460. doi: 10.1007/s10661-013-3264-6.
 19. *Hunt V.M., Jakobi S.K., Knutson M.G., Lonsdorf E.V.* A data management system for long-term natural resource monitoring and management projects with multiple cooperators// *Wildlife Society Bulletin*. 2015. Vol. 39 (3). P. 464—471. doi: 10.1002/wsb.547.
 20. *Красногорская Н.Н., Белозёрова Е.А., Мусина С.А., Нафикова Э.В.* Фрактальная модель вероятности паводковых наводнений на примере бассейна реки Уфа // XIV Международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2018)». 2018. С. 143—148.
 21. Официальный сайт Всероссийского научно исследовательского института гидрометеорологической информации. Каталог гидрологических постов ФГБУ «ВНИИГМИ—МЦД» Район 76. Кама. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data> (дата обращения 02.09.2017).
 22. Бюллетень «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2020 года»: [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 02.02.2021).
 23. Официальный сайт некоммерческого веб-картографического проекта по созданию подробной свободной и бесплатной географической карты мира: [Электронный ресурс]. URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (дата обращения 11.11.2020).
 24. Гидрологические ежегодники. 1963—1987. Т.4. Вып. 5—7.
 25. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году»: [Электронный ресурс]. URL: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/o-doklade/> (дата обращения 17.12.2020).
 26. *Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А.* Методология определения фрактальной размерности водосборной территории // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 62. С. 52—74. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-52-74.
 27. Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского: [Электронный ресурс]. URL: <https://vsegei.ru/ru/> (дата обращения 11.11.2020).
 28. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2011—2019 гг.: [Электронный ресурс]. URL: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/> (дата обращения 17.12.2020).

29. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2019 году: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic> (дата обращения 17.12.2020).
30. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.permecology.ru/ежегодный-экологический-доклад/ежегодный-экологический-доклад-2019/> (дата обращения 17.12.2020).
31. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2019 году» Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области: [Электронный ресурс]. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (дата обращения 17.12.2020).

References

1. Derevyago I.P., Dubenok S.A. *Ekonomicheskie instrumenty upravleniya vodnymi resursami i ob"ekta-mi i vodohozyajstvennymi sistemami v Respublike Belarus': tematicheskie materialy proekta «Vodnaya iniciativa ES plyus dlya Vostochnogo partnerstva»*. Economic instruments for managing water resources and facilities and water systems in the Republic of Belarus: thematic materials of the project "EU Water Initiative Plus for the Eastern Partnership". Minsk: BSTU, 2019: 304 p. [In Russian].
2. Kolbanev M.O., Palkin I.I., Tatarnikova T.M. Challenges of the digital economy. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSHU. 2020, 58: 156—167. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-156-167. [In Russian].
3. Strager M.P., Fletcher J.J., Strager J.M., Yuill C. Watershed analysis with GIS: the watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*. 2010, 36 (7): 970—976 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.003>.
4. Hewett C.J., Doyle M.A., Quinn P.F. Hydroinformatics framework to aid decision—making for catchment management. *Journal of Hydroinformatics*. 2010, 12 (2): 119—139. doi: 10.2166/hydro.2009.022.
5. Rong Y. *Practical environmental statistics and data analysis*. ILM publications. 2011: 269 p.
6. Rohmat F.I.W., Gates T.K., Labadie J.W. Enabling improved water and environmental management in an irrigated river basin using multi—agent optimization of reservoir operations. *Environmental modeling and software*. 2021, (135) 104909: 1—13. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104909.
7. Cyr-Gagnon J., Rodriguez M.J. Optimizing data management for municipal source water protection. *Land use policy*. 2021, (100) 103788: 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.12.035.
8. Nayan N. K., Das A., Mukerji A., Mazumder T., Bera S. Spatio-temporal dynamics of water resources of Hyderabad Metropolitan Area and its relationship with urbanization. *Land Use Policy*. 2020, (99) 105010: 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105010.
9. Isnain Z., Ghaffar S.N.A. Using the geographical information system (GIS) and remote sensing techniques for mapping the groundwater potential zones in Kg Timbang Dayang, Kota Belud, Sabah. *Water Conservation And Management*. 2020, 4(1): 57—60. doi: 10.26480/wcm.01.2020.57.60.
10. Abbas M.R., Hason M.M., Ahmad B.B., Rasib A.W.B., Abbas T.R. Variations size investigation in vegetation and surface waterbody for Central Part of Iraq using satellite imagery bands. 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, 928: 1—12. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022064.
11. Rotanova I.N. Geoinformation methods and systems in regional management (on the materials of the projects of the competition "RFBR—SIBERIA" (Altai Territory)). *Vestnik rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij*. Bulletin of the Russian Foundation for Fundamental Research. 2018, 4 (100): 62—66. doi: 10.22204 / 2410-4639-2018-100-04-62-66. [In Russian].
12. Yousaf W., Awan W.K., Kamran M., Ahmad S.R. A paradigm of GIS and remote sensing for crop water deficit assessment in near real time to improve irrigation distribution plan. *Agricultural Water Management*. 2021, (234) 106443: 1—15. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106443.
13. Mallik S., Mishra U., Paul N. Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic. *Ecological indicators*. 2021, 121: 1—10. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107179.
14. Li N. Early warning expert decision system of water resource management based on Cloud Computing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, 1648: 1—5. doi: 10.1088/1742—6596/1648/4/042096.
15. Shcherbinina S.V. *Ekologo-gidrologicheskaya ocenka sostoyaniya rechnyh vodosborov dlya utocheniya kompleksa vodohrannyh meropriyatij (na primere Voronezhskoj oblasti)*. Ecological and

- hydrological assessment of the state of river catchments to clarify the complex of water protection measures (on the example of the Voronezh region). Phd Dis. Voronezh, 2006: 154 p. [In Russian].
16. Nafikova E., Elizaryev A., Ismagilov A., Dorosh I., Khaidarshin A., Alexandrov D. Assessment of geoeological conditions and the depletion risk of the river Belaya catchment area. E3S Web of Conferences. 2020, 157: 1—8. doi: 10.1051/e3sconf/202015702003.
 17. Krasnogorskaya, N.N., Nafikova E.V. *Geoekologicheskaya ocenka i prognozirovanie opasnykh prirodno-tekhnogennykh processov na vodosbore reki*. Geoeological assessment and forecasting of hazardous natural and technogenic processes in the catchment area of the river. Ufa: Innovative mechanical engineering, 2015: 242 p. [In Russian].
 18. Kebo S., Bunch M.J. Canadian ENGOs in governance of water resources: information needs and monitoring practice. *Environmental monitoring and assessment*. 2013, 185 (11): 9451—9460. doi: 10.1007/s10661-013-3264-6.
 19. Hunt V.M., Jakobi S.K., Knutson, M.G., Lonsdorf E.V. A data management system for long-term natural resource monitoring and management projects with multiple cooperators. *Wildlife Society Bulletin*. 2015, 39 (3): 464—471. doi: 10.1002/wsb.547.
 20. Krasnogorskaya N.N., Belozeroва E.A., Musina S.A., Nafikova E.V. Fractal model of the probability of flood floods on the example of the Ufa river basin. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2018)"*. XIV International Scientific and Technical Conference "Science, Education, Production in Solving Environmental Problems (Ecology-2018)". 2018: 143—148. [In Russian].
 21. *Ofitsial'nyi sait Vserossiiskogo nauchno issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii. Katalog gidrologicheskikh postov FGBU «VNIIGMI—MTsD» Raion 76. Kama*. Official site of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information. Catalog of hydrological posts of FGBI "VNIIGMI—MCD" District 76. Kama. Available at: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data>. [In Russian].
 22. Bulletin "Population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2020". Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>. [In Russian].
 23. *Ofitsial'nyi sait nekommercheskogo veb-kartograficheskogo proekta po sozdaniyu podrobnoi svobodnoi i besplatnoi geograficheskoi karty mira*. The official site of the non-commercial web cartographic project for the creation of a detailed free geographic map of the world. Available at: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88>. [In Russian].
 24. *Gidrologicheskie ezhegodniki*. Hydrological Yearbooks. 1963—1987: 4 (5—7). [In Russian].
 25. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu»*. State report "About the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018". Available at: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/o-doklade>. [In Russian].
 26. Krasnogorskaya N.N., Belozeroва E.A. Methodology for determining the catchment area fractal dimension. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2021, 62: 52—74. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-52-74.
 27. *Ofitsial'nyi sait Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. A.P. Karpinskogo*. Official site of the Russian Research Institute named after A.P. Karpinsky Available at: <https://vsegei.ru/ru>. [In Russian].
 28. *Gosudarstvennyi doklad o sostoianii prirodnykh resursov i okruzhaiushchei sredy respubliki Bashkortostan v 2011—2019 gg.* State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan in 2011—2019. Available at: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures>. [In Russian].
 29. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Cheliabinskoi oblasti v 2019 godu*. Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2019. Available at: <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic>. [In Russian].
 30. *Doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Permskogo kraia»*. Report "On the state and protection of the environment of the Perm region." Available at: <http://www.permecology.ru/annual-ecological-report/annual-ecological-report-2019>. [In Russian].
 31. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Sverdlovskoi oblasti v 2019 godu» Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Sverdlovskoi oblasti*. State report "On the state and

protection of the environment of the Sverdlovsk region in 2019". Ministry of Natural Resources and Environment of the Sverdlovsk Region. Available at: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126>. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.03.2021

Принята к публикации после доработки 09.09.2021

Сведения об авторах

Красногорская Наталья Николаевна, д-р техн. наук, профессор, научный консультант НПП ООО «Юнисол», nk.ufa@mail.ru.

Белозерова Елена Алексеевна, начальник отдела внедрения информационных технологий и инноваций в медицинскую деятельность, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России», elena.belozerova.ufa@gmail.com.

Information about author

Krasnogorskaja Natalija Nikolaevna, Grand PhD (Tech. Sci.), scientific consultant, NPP Unisol LLC.

Belozerova Elena Alexeevna, Head of the IT and Innovations Department, Bashkir state medicine university.

Территориальная дифференциация водных и наземных геосистем с использованием данных космических сенсоров

***А.В. Бочаров¹, И.Н. Межеумов¹, П.М. Пахомов¹, С.Д. Хижняк¹,
О.А. Тихомиров¹, С.И. Биденко², П.Н. Кравченко³***

¹ ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверь, bochalex@bk.ru

² ПАО «Интелтех», Санкт-Петербург

³ Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва

Выделение границ водоемов и ареалов распространения водной растительности достаточно важная задача для оценки состояния, динамики развития и определения устойчивости экосистем водных объектов. В статье предложен алгоритм для выделения границ водных объектов и определения в них зон распространения воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Для реализации, предлагаемой в статье методики могут быть использованы данные космических сенсоров производящих съемку поверхности Земли в красном и ближнем ИК-участках спектра.

Ключевые слова: границы водных объектов, водная растительность, дистанционное зондирование Земли, Landsat.

Territorial differentiation of water and terrestrial geosystems using data from space sensors

***A.V. Bocharov¹, I.N. Mezheumov¹, P.M. Pakhomov¹, S.D. Khizhnyak¹,
O.A. Tikhomirov¹, S.I. Bidenko², P.N. Kravchenko³***

¹ FGBOU VO «Tver State University», Tver, Russia

² PAO «Inteltech», Saint-Petersburg, Russia

³ Moscow University named after S.Yu. Witte, Moscow, Russia

Identifying the boundaries of water bodies and areas of distribution of aquatic vegetation is a rather important task for assessing the state, dynamics of development and determining the stability of ecosystems of water bodies. The article proposes an algorithm for identifying the boundaries of water bodies and determining the zones of distribution of air-water vegetation in them based on multispectral data of remote sensing of the Earth. For the implementation of the methodology proposed in the article, the data of space sensors that survey the Earth's surface in the red and near-IR regions of the spectrum can be used.

In the course of the research, the spectral features of water bodies and aquatic vegetation were established. It was found that the best contrast of the water surface and land is observed in the near-IR range (5th channel of the Landsat-8 satellite (845—885 nm)). To create a mask for the boundaries of the reservoir, it is proposed to use the division of the image pixels by the value of reflectivity into two groups (water and land). In our case, the threshold value of the reflection coefficient between the pixels of satellite images corresponding to land and water surface was about 0.15.

On the basis of field surveys, a search for individual spectral characteristics of zones of development of air-water vegetation was carried out. The identification of these zones in inland water bodies is complicated by the large amount of impurities in the waters, which makes the reflection spectra of water masses and aquatic vegetation similar. Studies have shown that the presence of aquatic vegetation manifests itself