УДК 551.583

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

© 2024 Н.А. Жильникова[1], И.А. Шишкин[1], Х.О. Барххуев[2], Е.А. Минкинен[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 15.11.2024

Управление водными ресурсами с целью обеспечения экологической безопасности водных объектов является одним из важнейших показателей для достижения целей устойчивого развития. Для решения сложной задачи прогнозирования изменения объемов водопотребления и водоотведения в условиях изменения климата необходимы новые подходы к управлению водопользованием на регионально-бассейновом уровне, учитывающие климатические риски. Целью данного исследования является повышение эффективности управления водохозяйственной деятельностью промышленных производств и их адаптация к изменению климата. Механизм рационального водопользования, учитывающий комплекс социально-экономических, технологических и экологических показателей, основан на имитационном моделировании и нелинейной аппроксимации. Разработан метод, которые включает: модель комплексного распределения водных ресурсов с учетом климатических неопределенностей и рисков для моделирования оптимальной стратегии водопользования с целью принятия правильных управленческих решений; концепцию по адаптации к изменению климата водно-ресурсных систем территориальных природно-производственных комплексов, основанную на понятии упреждающего управления и сценарном планировании; методику по созданию гибких стратегий по адаптации к климатическим изменениям. Представленный метод может применяться водно-бассейновыми управлениями при разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов, предприятиями различных отраслей экономики при создании программ повышения экологической эффективности и разработке адаптационных мероприятий к изменениям климата. Предложена стратегия управления водопользованием для субъектов бассейна рек и озер Финского залива в условиях климатических изменений, внедрение которой позволит повысить эффективность взаимодействие производственных систем на регионально-бассейновом уровне, снизить потребление энергии на забор воды из водных объектов и очистку сточных вод и, таким образом, уменьшить выбросы парниковых газов.

Ключевые слова: климатическая неопределенность, водопользование, водные ресурсы, адаптация, изменение климата.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-175-184
EDN: LRQIQS

ВВЕДЕНИЕ

При распределении квот и лимитов на водопользование между субъектами территориального природно-производственного комплекса (ТППК) необходимо регулирование взаимодействия различных технологических, экономических, экологических и социальных факторов, а также соблюдения предприятиями современных законодательных требований, вызванных климатическими изменениями и связанными с обязательностью по снижению выбросов парниковых газов, которые, в свою очередь, вызывают потребность в разработке гибких стратегий по адаптации к изменению климата [1, 2]. Задача усугубляется более быстрым, чем ожидалось, изменением климата, которое воздействует на биофизические и биохимические процессы в водных объектах [3]. Прогнозирование изменения объемов водопотребления в среднесрочной и долгосрочной перспективе в условиях климатических неопределенностей является сложной проблемой при принятии решений. Для эффективной количественной оценки влияния такого рода неопределенностей на забор и использование водных ресурсов в реальных условиях обычно применяется метод имитационного моделирования, который позволяет учитывать совокупность социально-экономических, технологических и экологические показателей. До недавнего времени для решения

Жильникова Наталья Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: n.zhilnikova@guap.ru
Шишкин Илья Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: ilya@mail.ru
Барххуев Халид Османович, инженер Экологического компьютерного центра ВШТЭ СПбГУПТД. E-mail: axado111@gmail.com
Минкинен Елизавета Алексеевна, аспирант. E-mail: lisa.cross@mail.ru

подобных задач использовались статичные модели, которые основываются на механизме моделирования глобального распределения водных ресурсов в долгосрочной перспективе [4] и позволяют охватить водопользователей различных отраслей экономики. Однако, данные модели имеют ограничения, например, не учитывают динамику взаимоотношений между рациональным водопользованием, квотированием количества выбросов углерода и возобновляемыми источниками энергии. Таким образом, невозможно определить оптимальное распределение водных ресурсов между всеми предприятиями-водопользователями ТППК [3]. Для устранения данного ограничения ряд исследователей [5] предлагают использовать метод нелинейной аппроксимации эквивалентных параметров (NLCEQ: Nonlinear Certainty Equivalent Approximation Method), который позволяет решать крупномасштабные стационарные динамические задачи с бесконечным горизонтом планирования. С другой стороны, для решения большинства эколого-экономических проблем данный метод подходит не лучшим образом в связи с тем, что стохастические задачи водопользования характеризуются нестационарностью, и такие стохастические тенденции как климатические или технологические траектории не сходятся к стационарному состоянию. В работе [6] описан метод аппроксимации, эквивалентный моделируемой достоверности – метод моделирования аппроксимации эквивалентных параметров (МАЭП), который эффективно решает нестационарные динамические стохастические задачи, в том числе с высокой размерностью и множеством связующих ограничений. Данный метод достаточно точный и обеспечивает стабильные численные результаты при решении экономических динамических стохастических задач.

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ТППК

Для совершенствования системы распределения водных ресурсов ТППК в условиях климатических неопределенностей авторами предложена динамическая стохастическая модель комплексного распределения водных ресурсов в территориальных природно-производственных комплексах «Водные ресурсы-Водопотребление-Предприятие» - WRUM (*WRUM: Water Resources – Water Use – Manufacture*), основанная на методе МАЭП. Модель учитывает все виды использования водных ресурсов различными секторами экономики, в которых производственные процессы, обеспеченность ресурсами и другие внешние переменные стохастически эволюционируют во времени в соответствии с процессом Маркова с вероятностями временного перехода. Разработанная модель WRUM относится к стохастическим моделям водопотребления и водоотведения в различных отраслях экономики. Модель ориентирована на оптимальное распределение водных ресурсов между водопользователями в рамках одного ТППК во времени, и позволяет обеспечивать комплексное динамическое взаимодействие различных видов источников водных ресурсов, в рамках которого объективная функция экономики придает полезность производимым товарам и услугам (Рисунок 1).

В модель *WRUM* введены промежуточные показатели водопотребления и водоотведения: забор пресной воды для различных нужд и сброс сельскохозяйственных, производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, используемых повторно либо из вторичных источников водных ресурсов, либо напрямую [1]. Выходные данные (производимые товары и услуги) выражаются в расчете на душу населения.

Описание модели *WRUM*. Входные данные (первичные ресурсы)

Входные данные модели включают в себя общие первичные возобновляемые пресноводные ресурсы и вторичные источники водных ресурсов.

Общий объем первичных возобновляемых пресноводных ресурсов в модели (W_1) общий объем вторичных водных ресурсов (W_2) являются фиксированными величинами. Объемы внутренних возобновляемых водных ресурсов (W^I), внешних возобновляемых водных ресурсов (W^O), очищенных сточных вод (W^W), опресненных вод (W^D) и сельскохозяйственных дренажных вод (W^A) изменяются в период времени t. Объем внутренних возобновляемых водных ресурсов определяется как средний многолетний сток рек (W^R) и питание подземных вод (W^G), формируемых внутренними осадками. Внешние возобновляемые водные ресурсы включают реки водного бассейна, с учетом объема, забираемого водопользователями. Очищенные сточные воды, опресненные воды и сельскохозяйственные дренажные воды не используются напрямую, а сбрасываются в водные объекты, откуда забираются на нужды сельского хозяйства, жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и промышленного производства [1, 4].

Общий объем пресной воды (W^{total}), забираемый для нужд сельского хозяйства, ЖКХ и промышленного производства рассчитывается как сумма W_1 и W_2. При этом не учитывается вода, забираемая напрямую из вторичных источников (сброс очищенных сточных вод, сельскохозяйственных дренажных вод, опресненная вода) [1, 4].

Пресная вода из первичных возобновляемых водных ресурсов W_1 (за исключением под-

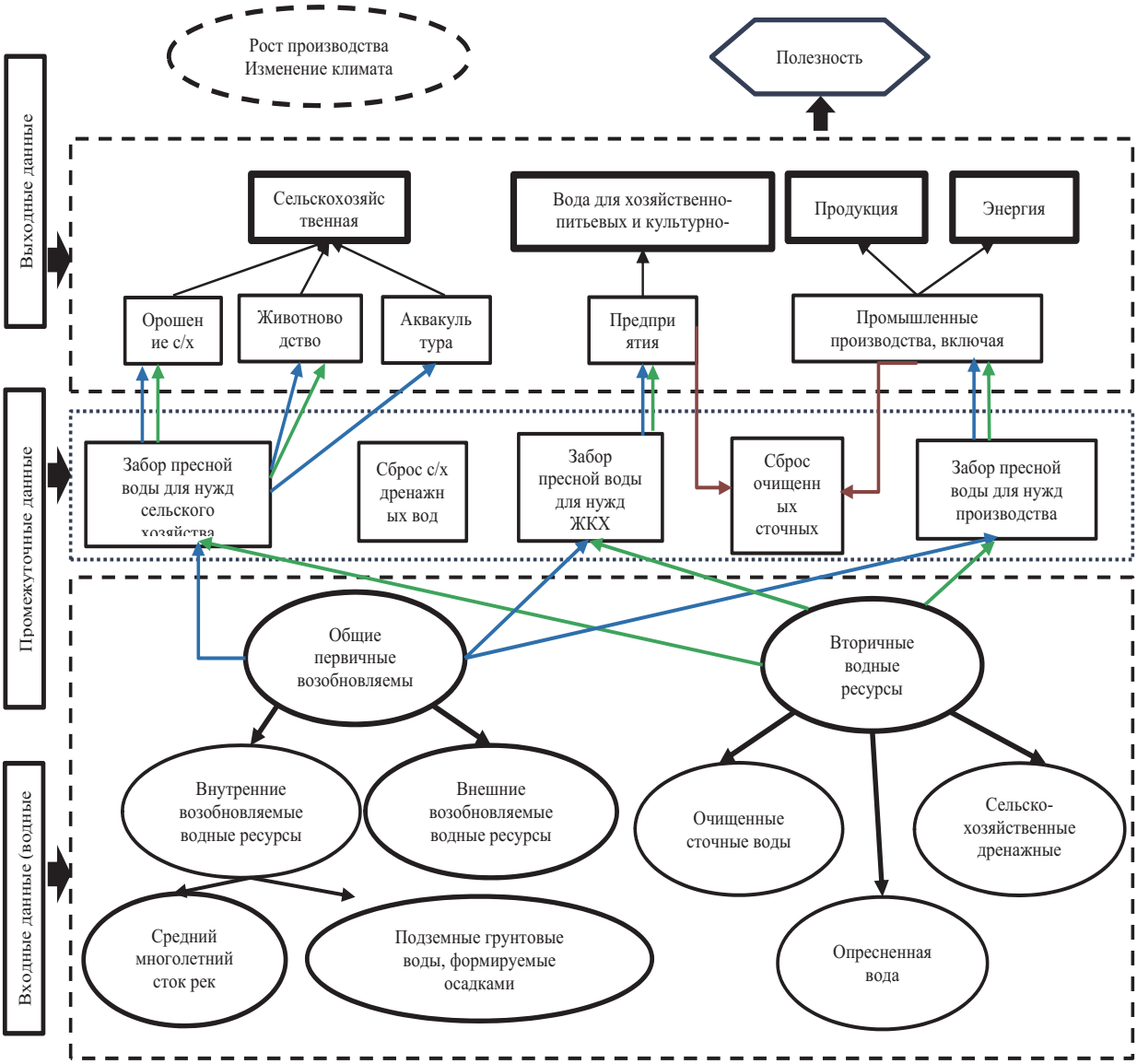

Рисунок 1. Модель комплексного распределения водных ресурсов в территориальных природно-производственных комплексах «Водные ресурсы-Водопотребление-Предприятие»

земных грунтовых вод) забирается сельскохозяйственными производствами для орошения, животноводства и выращивания аквакультуры (W^a), предприятиями ЖКХ для нужд населения (W^b) и промышленными производствами (W^c), включая энергетический сектор. Вторичная вода, забираемая из водных объектов, используется в тех же секторах экономики [1].

Объем пресноводных ресурсов водного бассейна с учетом водопотребления описывается следующими уравнениями:

$$W_{total} = W_1 + W_2, \quad (1)$$

$$W^{total} = \sum_{i=O,I,R,G,W,D,A} W_t^i - \sum_{j=a,b,c} W_t^j, \quad (2)$$

где i – вид водных ресурсов;

j – субъект водопользования.

После забора воды производственными секторами экономики (W^C) потенциал первичных водных ресурсов уменьшается, но может быть частично восстановлен за счет сброса очищенных сточных вод (включая ливневые), опресненной воды и осадков (W^S). При повторном изъятии воды из данных водных объектов, они преобразуются во вторичные водные ресурсы в зависимости от вида водопользования ($W_{2i,j}$).

Таким образом, распределение первичных водных ресурсов по времени, видам водных ресурсов и типам водопользования можно представить в виде:

$$W_{t+1}^{I,O} = W_t^{I,O} - W_t^C + W_t^{W,D,A,S}. \quad (3)$$

<u>Экзогенные входные данные (социально-экономические ресурсы)</u>

Первоначальная обеспеченность отраслей экономики другими первичными ресурсами, не относящимся к водным, такими как труд, физический и трудовой капитал, материальные ресурсы (X^o), в модели WRUM является экзогенной. Предполагается, что темпы роста социально-экономических ресурсов являются средним

приростом населения, отражающим демографические изменения, и рост физического капитала, $\kappa^{o,X}$. Следующее уравнение описывает объем предложения социально-экономических ресурсов [4]:

$$X_t^O = X_0^O\left[\alpha^{o,l}\frac{\Pi_t}{\Pi_0} + (1-\alpha^{o,l})(1+\kappa^{o,X})^t\right], \quad (4)$$

где Π_t – численность населения;

$\alpha^{o,l}$ – доля прироста населения в темпах роста всех первичных ресурсов.

Таким образом, переменные состояния для социально-экономических ресурсов, определяются как:

$$\boldsymbol{X} = (X^O).$$

Поскольку величина X^O является экзогенной и детерминированной, она является выведенной переменной состояния и не учитывается в качестве переменной состояния для решения задач с помощью модели WRUM.

Промежуточные данные модели

В качестве промежуточных данных в модели WRUM рассматриваются следующие виды водопотребления: забор воды для нужд сельскохозяйственных предприятий, забор воды для нужд жилищно-коммунального хозяйства, забор воды для нужд производства [1].

Вода для нужд сельского хозяйства применяется для орошения земель, используемых под растениеводство с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур (x^p), роста скота и птицы в животноводстве (x^n) и прироста производства аквакультуры (x^k) для получения сельскохозяйственной продукции (x^a). Побочным продуктом сельскохозяйственной деятельности являются стоки сельскохозяйственных дренажных вод, которые могут быть использованы повторно для орошения земель.

Водные ресурсы, изымаемые жилищно-коммунальными предприятиями, используются населением для культурно-бытовых и хозяйственно-питьевых нужд (x^b).

Вода, забираемые промышленными предприятиями, используется при производстве товаров и услуг, а также при производстве энергии (x^c).

Выходные данные модели (конечные товары и услуги)

В качестве выходных данных выбрано четыре параметра: сельскохозяйственная продукция (y^a), вода для хозяйственно-питьевых и культурно-бытовых нужд населения (y^b), промышленная продукция, включая энергию (y^c), и услуги экосистемы (y^r). Услуги экосистемы – это достояние общества, которое включает рекреационные услуги, биоразнообразие и другие экологические товары и услуги. Система спроса также содержит другие конечные товары и услуги (y^o), для которых используются первичные ресурсы, не потраченные на промышленное производство. Таким образом, определены все переменные состояния для детерминированной модели (S) [5]:

$$S := (W, X). \quad (5)$$

и векторная переменная (a_t) для принятия решений:

$$\boldsymbol{a}_t := (W_t^O, W_t^I, W_t^R, W_t^G, W_t^W, W_{1,t}^{I,O}, \dots, \dots, W_{v_{max},t}^{I,O}, W_t^D, W_t^A, W_t^S, \boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{y}_t), \quad (6)$$

где $\boldsymbol{x}_t \equiv [x_t^p, x_t^n, x_t^k, x_t^b, x_t^c]$;

$\boldsymbol{y}_t = (y_t^a, y_t^b, y_t^c, y_t^r, y_t^o)$;

v_{max} – изменение объема водных ресурсов со временем $v = 1, \dots, v_{max}$.

Производственные функции для конечных товаров и услуг на душу населения, можно проиллюстрировать следующим уравнением:

$$y_t^i = Y_t^i(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t), \quad i = f, l, e, w, r, \quad (7)$$

где $Y_t^i(\cdot)$ – стоимость других товаров и услуг, с учетом того, что некоторые переменные, из которых складывается стоимость, могут дублироваться.

Из уравнения (7) следует, что производство конечных товаров и услуг включает в себя комбинацию первичных и вторичных водных ресурсов и промежуточных водных ресурсов. Конкретные функциональные формы $Y_t^i(\cdot)$ являются функциями W и $\{x^j\}$. Все эти уравнения являются частью выполнимости условия при заданных ограничениях $a_t \in D_t(\boldsymbol{S}_t)$.

Производство промежуточных ресурсов или конечных товаров и услуг с использованием водных ресурсов требует затрат ($c^{o,i}$), которые вычитаются из экзогенных первичных ресурсов [5].

Целью специалиста по планированию является получение максимального общего благосостояния, которое представляет собой кумулятивную полезность от потребления населением конечных товаров и услуг, дисконтированных по постоянной ставке $\delta > 0$. Для решения задачи распределения потребления управляемых водных ресурсов в пределах территориальных природно-технических комплексов необходимо решить следующую задачу [1]:

Поскольку основное внимание в данной модели уделяется использованию водных ресурсов, в упрощенном виде вводится понятие другие товары и услуги (y^o). Никакие дополнительные затраты на производство других товаров и услуг не учитываются, полагая, что они отражаются в размере обеспеченности экзогенными первичными ресурсами.

Глобальные переменные

Полезность товаров и услуг

Полезность товаров и услуг на душу населения (u) определяется потреблением на душу населения переработанных сельскохозяйственных культур, продукции животноводства

и аквакультуры, промышленной продукции, энергии, услуг экосистем и других товаров [6]. Постоянный относительный показатель полезности, связанный с неприятием риска, определяется по формуле

$$u(\boldsymbol{y}) = \frac{C(y)^{1-\gamma}}{1-\gamma}, \quad (8)$$

где $C(\boldsymbol{y})$ – совокупность товаров и услуг, потребляемых на душу населения, нелинейный параметр по *y*;

γ – коэффициент относительного неприятия риска, который отражает отношение состояния экономики к неопределенным событиям.

Благосостояние

Выразим закон перехода первичных ресурсов в конечные товары и услуги в виде следующего уравнения [6]:

$$W_{t+1} = \boldsymbol{G}_t^W(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t), \quad (9)$$

где $\boldsymbol{G}_t^W$ – объем произведенных конечных товаров и услуг, с использованием первичных ресурсов, т,

и закон перехода социальных ресурсов в другие конечные товары и услуги в виде:

$$\boldsymbol{X}_{t+1} = \boldsymbol{G}_t^X(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t). \quad (10)$$

Объединив формулы (9) и (10), получаем уравнение для детерминированной модели:

$$\boldsymbol{S}_{t+1} = \boldsymbol{G}_t(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t), \quad (11)$$

$$\max_a \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t U(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t), \quad (12)$$

где δ – ставка дисконтирования;

U – функция полезности.

С учетом уравнений (6) и (7) и заданных ограничений

$\boldsymbol{W}_t(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t) \geq 0$, получаем

$$U(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t) = u(\boldsymbol{y}_t)\Pi_t, \quad (13)$$

где $U(\boldsymbol{S}_t, \boldsymbol{a}_t)$ – функция полезности,

Π_t – численность населения, млн.

Предложенная модель *WRUM* для комплексного распределения водных ресурсов в рамках ТППК может быть применена для моделирования оптимальной стратегии водопользования в ТППК при принятии решений по совершенствованию системы управления водными ресурсами, учитывающей климатические неопределенности и риски, на основе многофакторного подхода, разработанной авторами [3].

КОНЦЕПЦИЯ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА ВОДНО-РЕСУРСНЫХ СИСТЕМ В ГРАНИЦАХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Для создания успешной стратегии в работе предложена концепция по адаптации к изменению климата водно-ресурсных систем в границах территориальных природно-производственных комплексов с целью обеспечения их долгосрочной устойчивости. Суть разработанной концепции заключается в совокупности общих идей и методов управления водными ресурсами и системами водопользования предприятий-водопользователей с учетом климатических неопределенностей [3]. Для реализации концепции необходима разработка методов, позволяющих обеспечить управление и полноценную совместимость основных водно-ресурсных систем ТППК [1].

Одним из основных компонентов устойчивости водно-ресурсной системы (ВРС) ТППК является адаптивность, способность субъектов ВРС управлять системой, чтобы успешно приспосабливаться к изменениям.

Управление водными ресурсами с целью обеспечения экологической безопасности водных объектов является одним из важнейших показателей для достижения целей устойчивого развития. По мнению экспертов климатические изменения в последние десятилетия вызвали нарушения сложившихся гидрологических условий и трансформацию характера атмосферных осадков, что в свою очередь привело к изменению всемирного водного цикла.

Изменение климата признано мировым сообществом глобальной проблемой уже несколько десятилетий назад, однако, до недавнего времени большая часть усилий была направлена на снижение выбросов парниковых газов, а не на адаптацию к климатическим изменениям, включающим смягчение последствий. В последние годы проведено большое количество обширных научных исследований в области прогнозов дальнейшего изменения климата [9].

В России адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов, Указом Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529 являются приоритетными направлениями научно-технологического развития, а мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и изменения климата определены как критические технологии.

Работу по адаптации к изменению климата затрудняют отсутствие согласованной научной гипотезы относительно причин данного процесса, неопределенности в прогнозах влияния изменений на различные субъекты экономики. Высокий уровень неопределенности препятствует успешной адаптации при долгосрочном планировании землепользования, транспортных систем и систем водоотведения и водопотребления. Традиционное планирование «прогноз – план» подходит для стабильных водно-ресурсных систем в краткосрочной перспективе. Для долгосрочного прогнозирования необходимо применения стратегического и сце-

нарного планирования. Однако, такой подход требует обработки большого массива данных и применения методов имитационного динамического моделирования.

Адаптация к изменениям климата водно-ресурсных систем ТППК требует новой актуальной парадигмы, учитывающей различные возможные будущие климатические условия и те изменения в природно-технических системах, которые связаны с климатом. Современная модель должна быть основана на понятии «упреждающее управление» взамен управления водными ресурсами, основанного на анализе предыдущего опыта и знаний об изменчивости климата. В соответствии с [8, 9] упреждающее управление – это система институтов, правил и норм, которая предоставляет способ использования предвидения с целью снижения риска и повышения способности реагировать на события на ранних, а не на поздних стадиях их развития. Таким образом, анализ литературы позволил определить три основных ключевых этапа упреждающего управления водно-ресурсными системами: прогнозирование, разработка гибких стратегий адаптации и мониторинга водно-ресурсных систем ТППК, и реализация разработанных стратегий.

Одним из основных принципов упреждающего управления является постулат о том, что ряд отдельных аспектов управления водно-ресурсными системами не могут быть спрогнозированы. Таким образом, любой прогноз является одним из множества возможных сценариев.

Прогнозирование развития событий, связанных с изменением климата. На этапе прогнозирования разрабатывается и анализируется ряд возможных сценариев, из которых методами оценки рисков и анализа чувствительности, выбираются наиболее приемлемые сценария от беспроигрышного варианта до наихудшего, оцениваются различные последствия всех выбранных сценариев.

Разработка гибких стратегий адаптации водно-ресурсных систем ТППК к изменениям климата. На основе анализа всех выбранных сценариев разрабатываются мероприятия к одному или нескольким из возможных будущих сценариев. Ряд исследователей [9, 10] предлагают включать в план мероприятий гибкие действия, позволяющие учитывать неопределенности. Такие действия можно разбить на модули с учетом вида неопределенности и внедрять тот модуль, который наиболее соответствует текущей ситуации. Такой подход позволяет оптимизировать распределение расходов с течением времени и уменьшить потери. Гибкие стратегии могут включать в себя мероприятия, которые учитывают все будущие сценарии, планы реагирования на экстремальные гидрологические события, беспроигрышные варианты (краткосрочные действия, которые могут быть адаптированы со временем для реализации мероприятий по нескольким возможным сценариям) или наихудшие варианты (действия, направленные на борьбу с наихудшими последствиями), а также надежные действия. Надежные действия — это те действия, которые достаточно хорошо работают в различных возможных будущих сценариях на основе принятых уровней риска [10].

Мониторинг и реализация. Необходимо учитывать, что со временем меняются не только климатические условия, но и социально-экономические показатели, поэтому пересмотр планов мероприятий в рамках гибкой стратегии должен быть непрерывным процессом. Экспертами определено, что для успешной адаптации к климатическим изменениям мониторинг и реагирование на экстремальные события должны быть постоянными [8-10]. Также следует принимать во внимание то, что процесс климатических изменений развивается довольно медленно, поэтому стратегия по адаптации должна быть разработана на долгосрочный период.

Ключевым элементом успешной реализации гибкой стратегии является вовлечение заинтересованных сторон: органами государственного управления, бизнес-сообществ, научных организаций.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

В данной работе предложена методика разработки стратегий по адаптации к изменению климата для субъектов водопользования ТППК, которая включает следующие этапы:

Сценарное планирование для выявления показателей, способствующих возникновению неопределенностей.

1.1 Анализ существующей практики управления рассматриваемой водно-ресурсной системой по выбранным показателям, перечень которых может включать:

- правовое и законодательное регулирование;
- качество забираемой воды субъектами водопользования и сбрасываемых сточных вод от предприятий-водопользователей;
- техническое состояние водохозяйственной инфраструктуры;
- система мониторинга;
- система предупреждения и реагирования на экстремальные гидрологические события;
- методы принятия решений.

1.2 Ранжирование показателей по уровню неопределенности и важности.

1.3 Анализ статистических климатических данных. Моделирование потенциальных воз-

действий изменений температуры и осадков на водный бассейн территориального природно-производственного комплекса.

1.4 Разработка сценариев развития водохозяйственных систем в рамках ТППК с учетом климатических неопределенностей. В таблице приведены возможные сценарии и их описание.

Таблица. Возможные сценарии развития водохозяйственных систем в рамках ТППК с учетом климатических неопределенностей

Сценарий	Описание
Традиционное развитие	Прогноз основывается на анализе опыта и прошлых тенденциях. В будущем возможно возникновение крупных нештатных ситуаций.
Нормативы качества воды	Прогноз основывается на возможном ужесточении требований к качеству питьевой воды и очищенным стокам.
Значительное увеличение температуры поверхностных и подземных вод	Прогноз основывается на предположении о значительном потеплении, которое вызовет частые и сильные засухи.
Зеленая революция	Прогноз основывается на предположении, что экологические ценности и устойчивый образ жизни становятся доминирующими социальными нормами в обществе [8].
Экономические проблемы	Прогнозируется продолжение мирового энергетического кризиса, который будет сопровождаться длительным экономическим спадом.

2 Оценка эффективности водопользования в рамках водно-ресурсной системы ТППК.

2.1 Определение критериев эффективности и целевых показателей качества вод [3].

2.2 Определение ключевых проблем ВРС ТППК водного бассейна.

2.3 Установление лимитов и квот водозабора и сбросов для субъектов водопользования ВРС ТППК.

2.4 Составление водохозяйственных балансов в рамках разработки схем комплексного использования и охраны водных объектов.

2.5 Разработка водоохранных и водохозяйственных мероприятий для повышения эффективности водопользования в рамках ВРС ТППК.

3. Моделирование стратегии, соответствующей планируемым будущим сценариям и целям эффективности водопользования, а также способствующей минимизации затрат и негативного воздействия на окружающую среду, с учетом климатических рисков.

Применение предложенной методики при разработке гибких стратегий по адаптации к изменению климата для субъектов водопользования ТППК позволит структурировать и систематизировать возможные будущие сценарии эффективного развития водно-ресурсных систем в границах территориальных природно-производственных комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ. СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛЯ ТППК БАССЕЙНА РЕК И ОЗЕР ФИНСКОГО ЗАЛИВА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Анализ климатических статистических данных [11, 12] показывает, что в 2022 году обозначился тренд по значительному изменению наблюдаемого годового стока рек по сравнению со средними многолетними значениями, а также значениями 2021 года. Изменение климата в бассейне рек и озер Финского залива от границы РФ с Финляндией до северной границы бассейна реки Невы приводит к частым перепадам температуры, увеличению повторяемости морских нагонных наводнений. Эксперты прогнозируют до 2060 года повышение средней годовой температуры в регионе на с 2,5 до 3,5 ^{0}С, возрастание количества атмосферных осадков от 0,1 до 1,2 мм/сут, а также повышение среднего уровня моря в Восточной части Финского залива на 40 см [13, 14]. Уязвимость развития и функционирования водохозяйственной инфраструктуры рассматриваемого территориального природного-производственного комплекса обусловлена ее географическими и климатическими особенностями. Региональные планы по адаптации к изменениям климата предусматривают организацию эффективного управления в сфере охраны окружающей среды, включая адаптацию систем водоснабжения и водоотведения, развитие территориальной системы мониторинга, сокращение выбросов парниковых газов [15].

В работе предложена стратегия управления водопользованием для ТППК бассейна рек и озер Финского залива с учетом климатических рисков (Рисунок 2), внедрение которой позво-

лит повысить эффективность взаимодействие субъектов водопользования ТППК, снизить потребление энергии на забор воды из водных объектов и очистку сточных и, таким образом, уменьшить выбросы парниковых газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод комплексного управления водопользованием в производ-

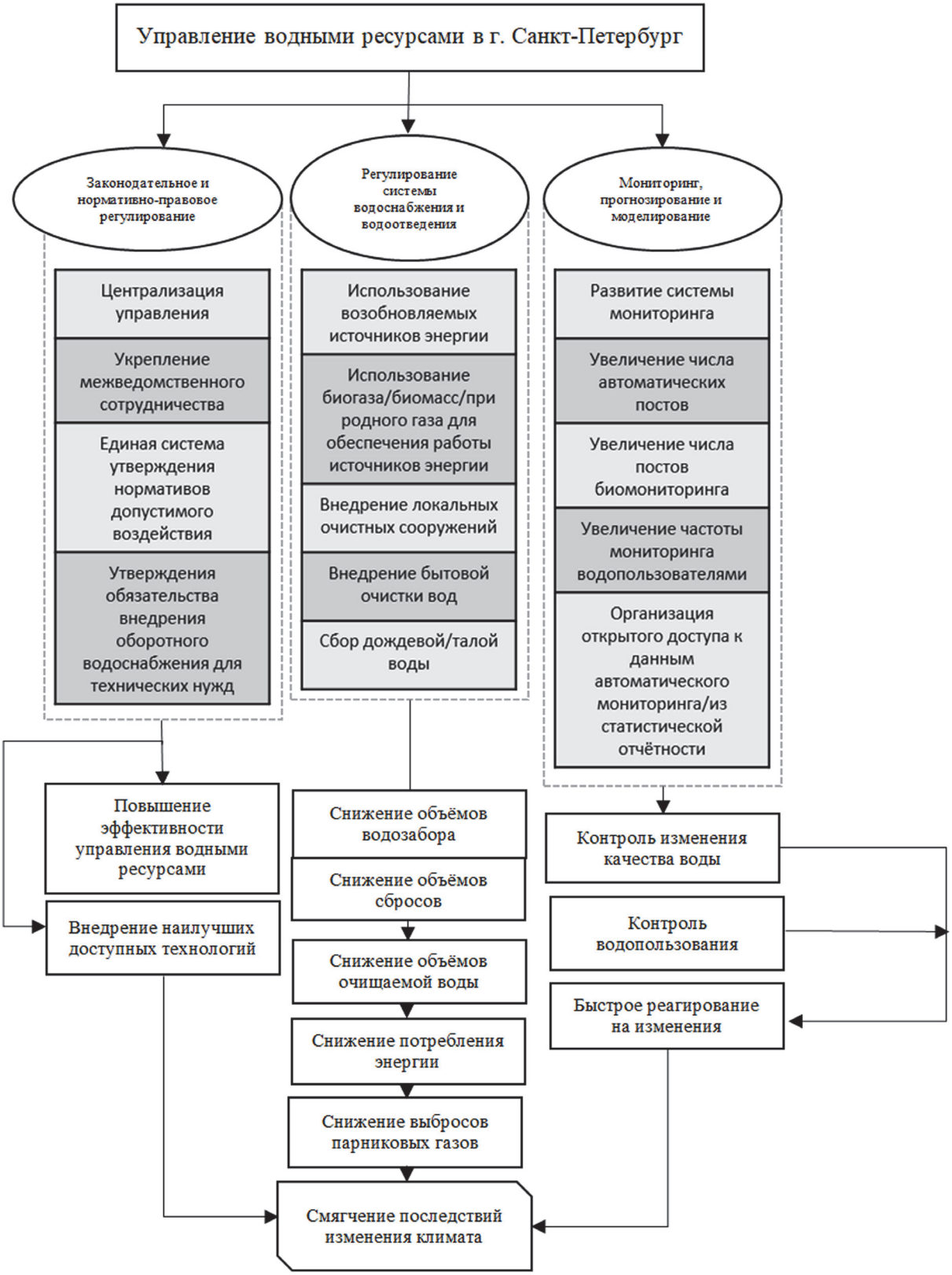

Рисунок 2. Стратегия управления водопользованием для ТППК бассейна рек и озер Финского залива в условиях климатических изменений

ственных системах с учетом климатических неопределенностей, сущность которого состоит в разработке системного подхода к решению задачи улучшения качества регулирования систем водопотребления и водоотведения в условиях изменения климата.

Структура метода:

1. Модель *WRUM* для комплексного распределения водных ресурсов в рамках ТППК.

2. Система управления водными ресурсами в ТППК на основе многофакторного подхода, учитывающая климатические неопределенности и риски [3].

3. Концепция по адаптации к изменению климата водно-ресурсных систем ТППК с целью обеспечения их долгосрочной устойчивости.

4. Методика разработки стратегий по адаптации к изменению климата для субъектов водопользования ТППК.

Настоящий метод может применяться водно-бассейновыми управлениями при разработке СКИОВО, предприятиями различных отраслей экономики при разработке программ повышения экологической эффективности и разработке мер по адаптации к изменениям климата с целью принятия правильных управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жильникова, Н.А.* Метод формирования межотраслевых и внутриотраслевых региональных (бассейновых) взаимоотношений водопользователей территориального природно-производственного комплекса / Н.А. Жильникова // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 5 (107). – С. 21-25.
2. Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации» https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/FEDERAL/climatedoctrine-2023.pdf (дата обращения 12.10.2024).
3. *Жильникова, Н.А.* Особенности управления сложными водно-ресурсными системами при изменении климата / Н.А. Жильникова, И.А. Шишкин, А.А. Баранова, Л.А. Климочкина // Компетентность / Competency (Russia). – 2023. – № 9-10. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-9-38-46.
4. *Jevgenijs Steinbuks, Yongyang Cai, Jonas Jaegermeyr, Thomas W. Hertel.* Assessing Effects of Climate and Technology Uncertainties in Large Natural Resource Allocation Problems // Geoscientific Model Development, 2024, 17(12):4791-4819. DOI:10.5194/gmd-17-4791-2024.
5. *Cai, Y., Judd, K., Steinbuks, J.* A Nonlinear Certainty Equivalent Approximation Method for Dynamic Stochastic Problems, Quantitative Economics, 8, 2017, 117–147, http://www.qeconomics.org/ojs/forth/533/533-3.pdf (дата обращения 12.10.2024).
6. *Cai, Y. and Judd, K.* A Simple but Powerful Simulated Certainty Equivalent Approximation Method for Dynamic Stochastic Problems, NBER Working Paper 28502, 2021.
7. Дудник, Т.А. Общественное благосостояние в современной экономике / Т.А. Дудник, Ю.В. Ляпало // Экономика и социум. – 2016. –.№ 5-1 (24). – С. 628-631.
8. Ray Quay. A Tool for Climate Change Adaptation // Journal of the American Planning Association, Vol. 76, No. 4, Autumn 2010. DOI 10.1080/01944363.2010.508428.
9. Fuerth, L.S. Foresight and anticipatory governance. Foresight, 11(4), 2009, 14–32.
10. Camacho, A.E. Adapting governance to climate change: Managing uncertainty through a learning infrastructure. Emory Law Journal, 59(1), 2009, 1–77.
11. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
12. Распоряжение Правительства Санкт-Петербурга от 21.12.2023 № 25-рп «Об утверждении Регионального плана адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата». https://npa.gov.spb.ru/SpbGovSearch/Document/57764.html
13. *Павловский, А.А.* О разработке и реализации первоочередных мер по адаптации Санкт-Петербурга к климатическим изменениям / А.А. Павловский // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 58. – С. 111-126. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-58-111-126.
14. *Дроздов, В.В.* Многолетние изменения климатических характеристик в Санкт-Петербурге и их возможные экологические последствия / В.В. Дроздов, Г. Т. Фрумин, А. В. Косенко // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 5. – С. 65-71. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-5-65-71.
15. *Близнецкая, Е.А.* Новая Климатическая доктрина России и особенности реализации международных актов в области климата в субъекте федерации (1) / Е.А. Близнецкая, С.В. Ивлев, А.Е. Кутейников // Электронное сетевое издание «Международный правовой курьер». – 2023. – № 7. – С. 30-34.

METHOD OF INTEGRATED WATER USE MANAGEMENT IN PRODUCTION SYSTEMS CONSIDERING CLIMATIC UNCERTAINTIES

© 2024 N.A. Zhilnikova[1], I.A. Shishkin[1], H.O. Barkhuev[2], E.A. Minkinen[1]

[1]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
[2] Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg, Russia

Water resources management to ensure environmental safety of water bodies is one of the most important indicators for achieving sustainable development goals. To solve the complex problem of forecasting changes in water consumption and sanitation in the context of climate change, new approaches to water management at the regional and basin level that take into account climate risks are needed. The objective of this study is to improve the efficiency of water management in industrial production and their adaptation to climate change. The mechanism of rational water use, taking into account a set of socio-economic, technological and environmental indicators, is based on simulation modeling and nonlinear approximation. A method has been developed that includes: a model of integrated water resources distribution taking into account climatic uncertainties and risks for modeling an optimal water use strategy in order to make the right management decisions; a concept for adaptation to climate change of water resource systems of territorial natural and production complexes, based on the concept of proactive management and scenario planning; a methodology for creating flexible strategies for adaptation to climate change. The presented method can be used by water basin managements in developing schemes for the integrated use and protection of water bodies, by enterprises in various sectors of the economy in creating programs to improve environmental efficiency and developing adaptation measures to climate change. A water management strategy is proposed for the entities of the river and lake basin of the Gulf of Finland in the context of climate change, the implementation of which will improve the efficiency of interaction of production systems at the regional-basin level, reduce energy consumption for water intake from water bodies and wastewater treatment and, thus, reduce greenhouse gas emissions.
Key words: climate uncertainty, water use, water resources, adaptation, climate change.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-175-184
EDN: LRQIQS

REFERENCES

1. *Zhil'nikova, N.A.* Metod formirovaniya mezhotraslevyh i vnutriotraslevyh regional'nyh (bassejnovyh) vzaimootnoshenij vodopol'zovatelej territorial'nogo prirodno-proizvodstvennogo kompleksa / N.A. Zhil'nikova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2020. – № 5 (107). – S. 21-25.
2. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii «Ob utverzhdenii Klimaticheskoj doktriny Rossijskoj Federacii» https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/FEDERAL/climatedoctrine-2023.pdf (data obrashcheniya 12.10.2024).
3. *Zhil'nikova, N.A.* Osobennosti upravleniya slozhnymi vodno-resursnymi sistemami pri izmenenii klimata / N.A. Zhil'nikova, I.A. Shishkin, A.A. Baranova, L.A. Klimochkina // Kompetentnost' / Competency (Russia). – 2023. – № 9-10. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-9-38-46.
4. Jevgenijs Steinbuks, Yongyang Cai, Jonas Jaegermeyr, Thomas W. Hertel. Assessing Effects of Climate and Technology Uncertainties in Large Natural Resource Allocation Problems // Geoscientific Model Development, 2024, 17(12):4791-4819. DOI:10.5194/gmd-17-4791-2024.
5. Cai, Y., Judd, K., Steinbuks, J. A Nonlinear Certainty Equivalent Approximation Method for Dynamic Stochastic Problems, Quantitative Economics, 8, 2017, 117–147, http://www.qeconomics.org/ojs/forth/533/533-3.pdf (data obrashcheniya 12.10.2024).
6. Cai, Y. and Judd, K.: A Simple but Powerful Simulated Certainty Equivalent Approximation Method for Dynamic Stochastic Problems, NBER Working Paper 28502, 2021.
7. Dudnik, T.A. Obshchestvennoe blagosostoyanie v sovremennoj ekonomike / T.A. Dudnik, Yu.V. Lyapalo // Ekonomika i socium. – 2016. –.№ 5-1 (24). – S. 628-631.
8. Ray Quay. A Tool for Climate Change Adaptation // Journal of the American Planning Association, Vol. 76, No. 4, Autumn 2010. DOI 10.1080/01944363.2010.508428.
9. Fuerth, L.S. Foresight and anticipatory governance. Foresight, 11(4), 2009, 14–32.
10. Camacho, A.E. Adapting governance to climate change: Managing uncertainty through a learning infrastructure. Emory Law Journal, 59(1), 2009, 1–77.
11. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2022 godu. Gosudarstvennyj doklad. – M.: Minprirody Rossii; MGU imeni M.V. Lomonosova, 2023. – 686 s.
12. Rasporyazhenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 21.12.2023 № 25-rp «Ob utverzhdenii Regional'nogo plana adaptacii Sankt-Peterburga k izmeneniyam klimata». https://npa.gov.spb.ru/SpbGovSearch/Document/57764.html
13. Pavlovskij, A.A. O razrabotke i realizacii pervoocherednyh mer po adaptacii Sankt-Peterburga k klimaticheskim izmeneniyam / A.A. Pavlovskij // Gidrometeorologiya i ekologiya. – 2020. – № 58. – S. 111-126. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-58-111-126.
14. Drozdov, V.V. Mnogoletnie izmeneniya klimaticheskih harakteristik v Sankt-Peterburge i ih vozmozhnye ekologicheskie posledstviya / V.V. Drozdov, G. T. Frumin, A. V. Kosenko // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2021. – T. 25. – № 5. – S. 65-71. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-5-65-71.
15. Blizneckaya, E.A. Novaya Klimaticheskaya doktrina Rossii i osobennosti realizacii mezhdunarodnyh aktov v oblasti klimata v sub»ekte federacii (1) / E.A. Blizneckaya, S.V. Ivlev, A.E. Kutejnikov // Elektronnoe setevoe izdanie «Mezhdunarodnyj pravovoj kur'er». – 2023. – № 7. – S. 30-34.

Natalya Zhilnikova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems. E-mail: n.zhilnikova@guap.ru
Ilya Shishkin, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems. E-mail: ilya@mail.ru
Khalid Barkhuev, Post-Graduate Student. E-mail: axado111@gmail.com
Elizaveta Minkinen, Post-Graduate Student. E-mail: lisa.cross@mail.ru