

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 502.2:007(470.2)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО-СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВОДОЕМ–ВОДОСБОР НА ПРИМЕРЕ БЕЛОМОРЬЯ¹

© 2020 г. В. В. Меншуткина^а, *, Н. Н. Филатов^б, **

^аИнститут проблем региональной экономики РАН,
Санкт-Петербург, 190013 Россия

^бИнститут водных проблем Севера ФИЦ КарНЦ РАН,
Петрозаводск, 185030 Россия

*e-mail: menshutkina.n@gmail.com

**e-mail: nfilatov@rambler.ru

Поступила в редакцию 09.08.2019 г.

После доработки 09.11.2019 г.

Принята к публикации 12.11.2019 г.

Представлена разработка когнитивной модели оптимального управления эколого-социо-экономической системой водоем–водосбор на примере Белого моря и водосбора (Беломорья). Модель включает в себя параметры, характеризующие климат, водные и наземные системы моря и водосбора, экономику, рыболовство, сельское хозяйство, минеральные ресурсы, а также население. С использованием когнитивного моделирования исследуются только качественные изменения, происходящие в системе при разном комплексе условий. Критерием оптимизации служит уровень жизни населения региона. Рассмотрены сценарии различных климатических условий, инвестиций в производственные фонды, очистки промышленных и бытовых стоков, развитие сельского хозяйства и рыболовства. С помощью когнитивной модели были выполнены 10 экспериментов с разными сценариями. Для каждого сценария определены режимы управления, обеспечивающие наиболее высокий уровень жизни населения. Наивысший уровень жизни населения достигается при сценарии, предусматривающем благоприятные климатические условия (потеплением выше климатической нормы 1960–1990 гг.), достаточными минеральными ресурсами и инвестициями. Максимальный уровень развития сельского хозяйства может нанести ущерб окружающей среде. Разработанная когнитивная модель как средство стратегического планирования выполнена на качественном уровне.

Ключевые слова: водосбор, водоем, климат, экономика, рыболовство, когнитивная модель, население, управление.

DOI: 10.31857/S0321059620030116

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы управления окружающей средой и природными ресурсами, как правило, сложны. Эколого-социо-экономические системы водоем–водосбор включают в себя несколько подсистем, таких как экологические, ресурсные, экономические, социальные, при этом они представляют множество “участников”, имеющих разные и противоречивые интересы и цели [7, 21]. Для исследования таких сложных комплексных систем применяют разнообразные типы моделей и методов. Среди них выделяют так называемые исследовательские модели, предназначенные для

анализа процессов, и модели, ориентированные на решение практических вопросов управления. Для изучения сложных систем и управления ими может использоваться когнитивный подход, результаты реализации которого применяются в дальнейшем для решения задач управления [20, 34, 35]. Применение методов когнитивного моделирования интенсивно распространяется из области лингвистики и психологии на другие области знания [2, 23], например на моделирование эколого-экономических систем [1, 2, 5, 13, 32, 34] и задачи управления региональным потенциалом [6, 8, 14, 25].

Предлагаемая модель оптимального управления эколого-социо-экономической системой водоем–водосбор представляет собой развитие когнитивных эколого-экономических моделей [21, 22] и рассматривается на примере Белого моря и его

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, в рамках проекта “Арктика” № 1805-60296 в ИВПС КарНЦ РАН, разработка когнитивной модели – в рамках госзадания ИПРЭ РАН АААА-А19-119021390164-1.

водосбора (Беломорье). При моделировании сложной социо-эколого-экономической системы водоем–водосбор учитывались как прямые, так и обратные связи внутри подсистем и между ними. Исследование основано на системном подходе, поэтому все подсистемы модели должны быть чувствительны к использованию разнообразных пространственно-временных данных разного масштаба, характеризующих подсистемы, и реагировать на разные сценарии внешних воздействий.

Ранее для Беломорья была разработана первая когнитивная модель [22], отображающая изменения климата, качество вод, поступающих с речным стоком, и качество морских вод, а также экономические и социальные процессы в субъектах Российской Федерации и ряд других процессов. Разработанная когнитивная модель состоит из четырех частей: климатической, экосистемной, социально-экономической и управленческой. Рассмотрены современное состояние и изменения социальной сферы, окружающей среды, зависящие от объемов загрязнений, поступления биогенов на водосбор и в море, а также от выбросов в атмосферу, как сформированных на водосборе Белого моря, так и поступивших из-за пределов водосбора. Показано, что при инерционном сценарии развития экономики регионов на территории водосбора отмечается сохранение относительно низкого уровня загрязнения моря за последние почти 30 лет [22]. Оказалось, что увеличение инвестиций в экономику регионов на территории бассейна Белого моря, рост валового регионального продукта должны приводить к увеличению биогенной нагрузки и сбросу загрязнений в Белое море, что повлияет на сокращение рыбных запасов. С ростом инвестиций необходимо увеличение численности населения для эффективного использования капиталовложений. Предложен критерий управления системой, который основан на представлении о том, что цель управления – повышение уровня жизни населения.

В настоящей работе предпринимается попытка определения таких режимов управляющих воздействий, которые обеспечили бы достижение максимальной величины некоторого выбранного критерия, в данном случае – уровень жизни населения [10, 11, 24]. Решается многокритериальная задача [12].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для получения социо-экономической информации использовались данные из работ [26, 28]. Для оценки и прогноза развития экономики применялись модели [4, 9]. И, наконец, использовались созданные в ИВПС КарНЦ РАН геоинформационные системы, базы данных, атлас Белого моря и водосбора [31]. Изучение изменчивости

климата проводилось по данным наиболее длительных инструментальных наблюдений на метеорологических станциях (МС) и постах Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [31]. В качестве сценариев изменений климата использовались оценки IPCC [33], согласно которым, норма температуры воздуха (осредненная за 30 лет) в регионе может возрасти к 2030 г. на 1–2°C. Динамика рыболовства в Белом море изучалась по [27].

Ранее было показано, что развитие регионов на территории водосбора Белого моря определяется динамикой инвестиций, которые с 1990 г. к 2015 г. сократились в среднем в два раза, а по северным районам Беломорья – до 5–10 раз, и только два региона (Вологодская и Архангельская области) к 2010 г. смогли достичь дореформенного уровня [9]. Рассмотрено современное состояние и изменения социальной сферы, окружающей среды, зависящие от объемов загрязнений, поступления биогенов на водосбор и в море, а также от выбросов в атмосферу, сформированных как на водосборе, так и трансграничными переносами.

Основная трудность при построении обобщающих моделей подобного типа заключается в качественной разнородности величин, характеризующих состояние подсистем, составляющих единое целое. Если для экологических моделей связующее – баланс вещества и энергии, то в экономике к ним добавляются понятия стоимости, а в социологии господствуют исключительно процессы передачи информации. Если основу традиционных экологических или экономических моделей составляют сведения об объектах моделирования, выраженные в именованных величинах (тоннах, градусах, рублях и т.п.), как и данные, полученные в результате натурных измерений [19], то когнитивные модели оперируют безразмерными относительными величинами от 0 до 1, к которым неприменимы законы сохранения. Для традиционных моделей разработана процедура идентификации, которая неприменима в чистом виде к когнитивным моделям. Такова плата за возможность описания в одной модели процессов самой разной природы, таких как фотосинтез в водных и наземных экосистемах, передача вещества и энергии в трофических сетях, взаимодействие человека с природой – от земледелия и рыболовства до туризма, производство, демографические и политологические проблемы, включая, например, модели коррупции – далеко не полный набор проблем, с которыми приходится иметь дело при создании моделей рассматриваемого типа.

При создании когнитивной модели для задач управления были получены сведения о динамике подсистем (экосистем моря, экономики регионов, социальной сферы) с использованием соот-

ветствующих классических подходов. Например, термогидродинамика водоемов и экосистем рассчитывалась с использованием 3D-моделей, основанных на уравнениях геофизической гидродинамики и различных балансовых соотношениях [29]; допустимые уловы рыбы – по уравнениям Баранова и Бивертон–Холта [17]; изменения в экономике регионов – с использованием функции Кобба–Дугласа и различных эмпирических зависимостей [15]; для социологических подсистем – агент-ориентированное моделирование [16]. В идеальном случае все частные результаты, полученные гидрологами, гидрофизиками, биологами, экономистами, демографами, социологами и другими специалистами должны быть так агрегированы специалистами, чтобы их можно было включить в состав когнитивной социо-эколого-экономической модели. Когнитивная модель оптимального управления системой водоем–водосбор предназначена для прогнозирования на качественном уровне изменений сложной системы при различных сценариях природопользования и изменений климата. Полученные результаты могут быть основой системы поддержки принятия управленческих решений, необходимых для достижения устойчивого развития социально-экономической системы регионов.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Водосбор Белого моря включает в себя северные и периферийные регионы России, развитие которых зависит от наличия доступных востребованных природных ресурсов. Соответственно, основу экономики северных регионов составляет добыча природных ресурсов и их первичная переработка. А в южных регионах расположены перерабатывающие предприятия, прежде всего – металлургические и целлюлозно-бумажные.

Экономика Беломорья определяет развитие социальной сферы, состояние окружающей среды, которое зависит от объема загрязнений, поступление биогенов на водосбор и в море, а также от выбросов в атмосферу как на водосборе, так и от трансграничных переносов. Добывающая, металлургическая, бумажная, деревообрабатывающая промышленность, в которую вкладываются основные инвестиции в Беломорье, влияет на состояние окружающей среды. Водосбор моря включает в себя частные водосборы рек Мурманской области (9% всего водосбора Белого моря), северной части территории Республики Карелии (14%); но основная часть водосбора (77%) расположена в Архангельской, Вологодской областях и Республике Коми. Средний многолетний сток рек в Белое море за период наблюдений (1946–2010 гг.) равен 226 км³, на долю основных рек бассейна – Северной Двины, Мезени и Онеги – приходится 148.7 км³, или 65.8% водных ресурсов

бассейна моря. Средние величины сезонного стока на рассматриваемой территории колеблются в широких пределах и зависят не только от климатических условий, но и от рельефа, характера почво-грунтов, озерности частных водосборов, а также от влияния искусственного внутригодового перераспределения стока [30]. Сброс загрязненных сточных вод в изучаемом регионе обусловлен в основном деятельностью предприятий металлургии, лесопереработки и целлюлозно-бумажной промышленности. Наибольший объем сброса загрязненных сточных вод на водосборе Белого моря приходится на города Коряжму, Сыктывкар, Вологду, Сегежу, Северодвинск, Новодвинск, Костомукшу, Сокол и Архангельск. На остальной территории водосбора сбросы загрязненных сточных вод значительно меньше.

Когнитивная карта настоящей модели представлена на рис. 1. Состояния концептов описываются действительными числами в диапазоне от 0 до 1. Связи между концептами описываются при помощи функций вероятностной или нечеткой логики [2]: дизъюнкции ($AVB = A + B - A * B$), конъюнкции ($AAB = A * B$) и отрицания ($\neg A = 1 - A$). Все концепты полагаются изменяющимися во времени (t) с шагом в один год.

Входные переменные модели – климатические условия (CLIMAT) – описание состояний таких величин, как среднегодовая температура воздуха (TEMPA), сумма атмосферных осадков за год (PRES), суммарное испарение (EVA), а также суммарный годовой сток рек в Белое море (FLOW). Последняя величина разделяется по рекам Северная Двина, Мезень, Онега, Поной, а также Кемь, Нижний Выг и Ковда. Значения всех перечисленных величин по годам оцениваются по данным измерений [31].

Климатические условия влияют на многие составляющие системы: продолжительность жизни населения (MORT), развитие фитопланктона в море (PHYTO) и продуктивность наземных лесных сообществ (WOOD) и почв (SOIL):

$$MORT(t) = CLIMAT(t) \wedge POLL(t).$$

На продолжительность жизни населения влияет степень загрязнения среды (POLL). Рождаемость считается зависящей не только от уровня жизни (LEV_LIFE), но и от специальных мер, направленных на повышение рождаемости и снижение детской смертности (C_BIRTH). Численность населения (POPUL) – результат взаимодействия процессов рождаемости и смертности с учетом продолжительности жизни:

$$BIRTH(t) = LEV_LIFE(t) \wedge C_BIRTH,$$

$$POPUL(t+1) = (POPUL(t) \vee BIRTH(t)) \vee \neg MORT(t).$$

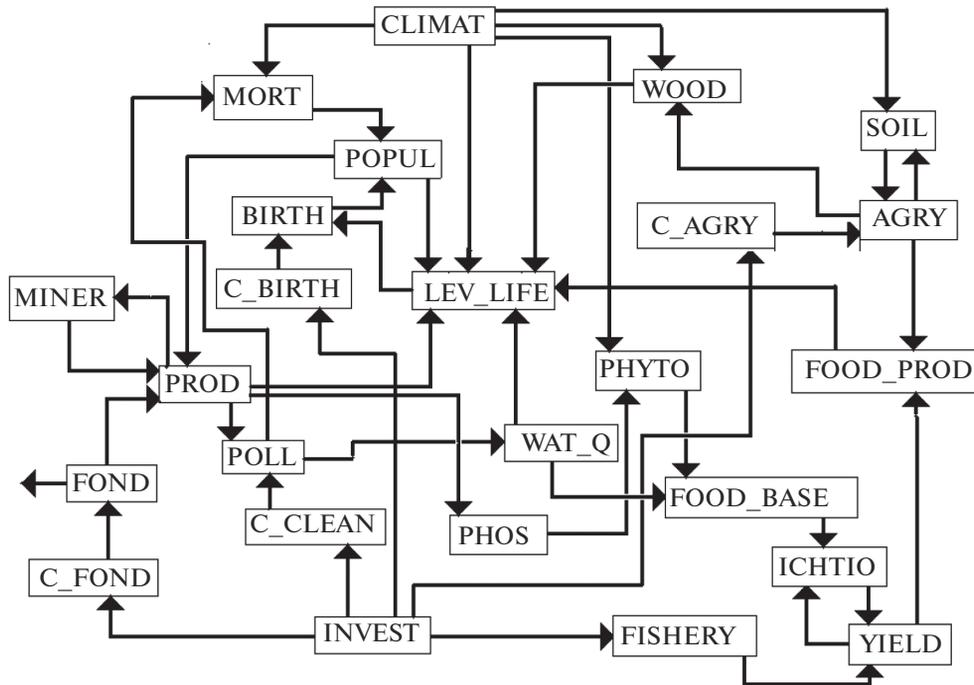


Рис. 1. Когнитивная карта эколого-социо-экономической системы для Беломорья. CLIMAT – климатические условия, POPUL – численность населения, MORT – смертность населения, BIRTH – рождаемость населения, LEV_LIFE – уровень жизни населения. PROD – валовой продукт, FOND – производственные фонды, MINER – запасы минерального не возобновляемого сырья, POLL – загрязнение окружающей среды, WAT_Q – качество воды, FOOD_BASE – кормовая база промысловых рыб, ICHTIO – ихтиомасса промысловых рыб, YIELD – вылов рыбы, FISHERY – инвестиции в развитие рыболовства, WOOD – площадь, занимаемая лесами, SOIL – качество почвы, AGRY – интенсивность сельского хозяйства, FOOD_PROD – производство пищевых продуктов для населения, C_BIRTH – инвестиции для увеличения рождаемости, C_CLEAN – инвестиции в средства очистки промышленных и бытовых стоков, C_FOND – инвестиции в развитие промышленных фондов, C_AGRY – инвестиции в развитие сельского хозяйства, INVEST – суммарные инвестиции.

Антропогенное воздействие на окружающую среду водосбора Белого моря снизилось после 1991 г. первоначально за счет спада экономики, а затем за счет ее модернизации и инвестиций в охрану окружающей среды [9]. Уменьшение воздействия на окружающую среду происходит медленно: выбросы в атмосферу от стационарных источников сократились за последние 10 лет на 20%. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу уменьшились во всех шести регионах. На рис. 2 показана динамика сбросов загрязненных сточных вод в шести регионах, полностью или частично входящим в водосбор Белого моря.

В целом, по большинству показателей экологическая ситуация на водосборе улучшается, но сбросы загрязненных сточных вод в море за последние 20 лет уменьшились незначительно. Основное снижение сбросов на ~40% с 1995 по 2015 г. приходится на Архангельскую и Вологодскую области. В Карелии сбросы не уменьшились, а в Мурманской области выросли на ~10%. В Архангельской области произошло заметное снижение сбросов, частично связанное с закрытием предприятий. Сброс загрязненных сточных вод в изу-

чаем регионе проводился в основном предприятиями металлургии, лесопереработки и целлюлозно-бумажной промышленности. Наибольший объем сброса загрязненных сточных вод на водосборе Белого моря приходится на города Коряжму, Сыктывкар, Вологду, Сегежу, Северодвинск, Новодвинск, Костомукшу, Сокол и Архангельск, а на остальной территории водосбора сбросы загрязненных сточных вод значительно меньше, они сократились за десять лет всего на ~16%.

Экосистемная часть модели выражает изменение во времени гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик Белого моря. Экосистемная часть модели представляет собой свертку (агрегированные сведения) результатов модели Белого моря, разработанной О.П. Савчуком и И.А. Нееловым [3], как в пространстве, так и во времени. Содержание фосфатов в воде Белого моря WS_P определялось по распределению стока рек FLOW с учетом интенсивности сельского хозяйства AGRY на территории водосбора каждой реки. Первичная продукция и связанная с ней биомасса фитопланктона

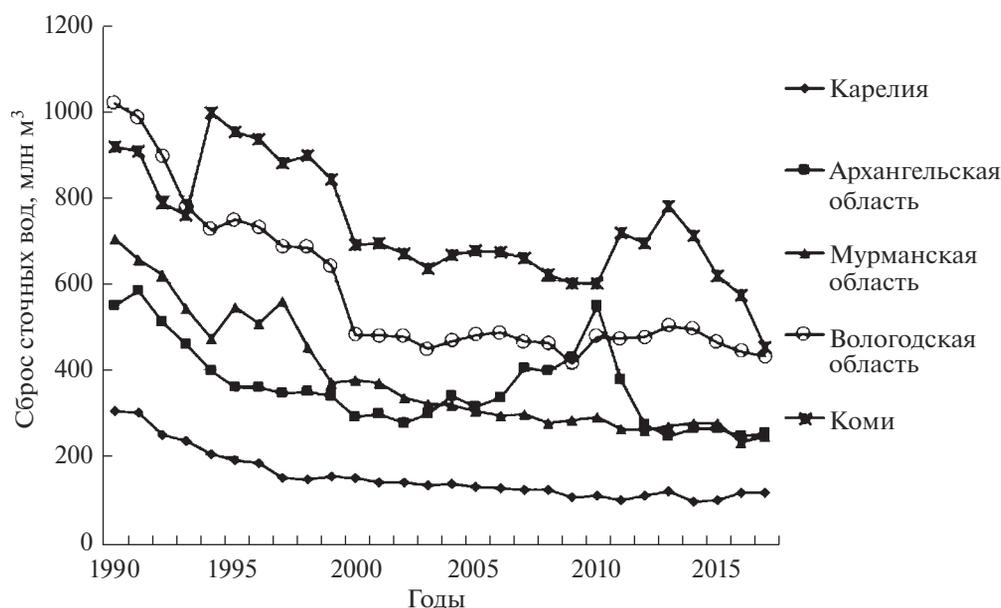


Рис. 2. Динамика сбросов загрязненных сточных вод в шести регионах, полностью или частично входящим в водосбор Белого моря (млн м³) за 1995–2015 гг. [30].

WS_PHYTO полагалась лимитированной содержанием биогенов в воде Белого моря: фосфатов WS_P и нитратов WS_N. При этом использовалась функция “мягкой” конъюнкции CON, которая определяется как аналог закона Либиха. Концентрация загрязняющих веществ в Белом море WS_POLL определялась исходя из величины стока FLOW. Также определяется нагрузка по нитратам и фосфатам, но источником загрязнения полагается не сельское хозяйство и бытовые стоки, а промышленное производство PROD каждого района на водосборе. Загрязняющие вещества, особенно в высоких концентрациях, вызывают повышение смертности зоопланктона и рыб. В модели это явление интерпретируется при помощи логической функции “жесткого” отрицания NO.

Степень загрязнения окружающей среды стоками (POLL) оценивается по величине продукции промышленности, а степень очистки сточных вод очистными сооружениями (C_CLEAN) определяется уровнем инвестиций в эту отрасль:

$$POLL(t+1) = POLL(t) \vee PROD(t),$$

$$POLL(t+1) = POLL(t+1) \vee \neg C_CLEAN.$$

Качество воды водоемов (WAT_Q) полагается обратно пропорциональным ее загрязнению промышленными и бытовыми стоками (POLL), пропорциональными численности населения (POPUL).

Экономическая часть модели содержит имитацию функции Кобба–Дугласа, которая является производственной функцией (или функцией по-

лезности) и отражает зависимость объема производства от факторов производства – затрат труда и капитала. Она полагается пропорциональной численности населения и производственным фондам (FOND):

$$PROD(t+1) = POPUL(t) \wedge FOND(t).$$

Использование при создании продукции невозобновляемых минеральных ресурсов (MINER) и убыль этих ресурсов учитываются при оценке создаваемой продукции. Производственные фонды уменьшаются в процессе амортизации (AMOR), но могут и пополняться при помощи специальных инвестиций (C_FOND):

$$FOND(t+1) = FOND(t) \wedge AMOR,$$

$$FOND(t+1) = FOND(t+1) \vee C_FOND.$$

Оценка уровня жизни населения (LEV_LIFE) – достаточно сложная задача, которой посвящены специальные исследования [10, 11]. В настоящей модели ограничимся только учетом зависимости LEV_LIFE от валового регионального продукта на душу населения (PROD/POPUL), загрязненности окружающей среды (POLL), степени сохранности территорий, не используемых под поселения, промышленные и сельскохозяйственные предприятия (WOOD); наличием продуктов питания (FOOD_PROD) и климатическими условиями (CLIMAT).

Переходя к описанию экологической части моделируемой системы, укажем, что поступающие в водоем (Белое море) биогенные вещества вызывают эвтрофикацию (PHOS), которая счита-

ется пропорциональной объему производимой продукции и интенсивности сельского хозяйства на водосборе (AGRY):

$$\text{PHOS}(t+1) = \text{PROD}(t) \vee \text{AGRY}(t).$$

Первичная продукция фитопланктона (PHYTO) оценивается путем имитации закона Либиха, а интенсивность солнечной радиации оценивается по климатическим условиям (CLIMAT):

$$\text{PHYTO}(t+1) = \text{PHOS}(t) \wedge \text{CLIMAT}(t+1).$$

Кормовая база промысловых рыб (FOOD_BASE) с достаточной степенью условности оценивается по величине первичной продукции и отрицательному влиянию загрязнения водоема на развитие зоопланктона и бентоса. Основные промысловые рыбы в Белом море в настоящее время – навага и сельдь [27]. При этом учитывается инерционность во времени оцениваемой величины:

$$\begin{aligned} \text{FOOD_BASE}(t+1) &= \\ &= \text{FOOD_BASE}(t) \vee \text{PHYTO}, \\ \text{FOOD_BASE}(t+1) &= \\ &= \text{FOOD_BASE}(t+1) \vee \neg \text{POLL}(t). \end{aligned}$$

Ихтиомасса промысловой рыбы (ICHTIO) также обладает инерционностью во времени и уменьшается в результате промыслового воздействия (C_FISH). Ихтиомасса пополняется за счет ее кормовой базы. Сложные процессы, связанные с разведением, в модели не учитываются:

$$\begin{aligned} \text{ICHTIO}(t+1) &= \text{ICHTIO}(t) \vee \text{FOOD_BASE}(t), \\ \text{ICHTIO}(t+1) &= \text{ICHTIO}(t+1) \vee \neg \text{C_FISH}. \end{aligned}$$

Объем вылова рыбы (YIELD) пропорционален интенсивности рыболовства (C_FISH) при наличии промысловых рыб (ICHTIO):

$$\text{YIELD}(t+1) = \text{ICHTIO}(t) \wedge \text{C_FISH}(t).$$

Так называемые нетронутые наземные экологические системы представлены в модели для территорий, не используемых поселениями, промышленными и сельскохозяйственными предприятиями (WOOD) и сельскохозяйственными культурами (AGRY), для развития которых существенное значение имеет состояние почв (SOIL). Экосистемы территорий, не используемых поселениями, промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, находится в антагонистических отношениях с сельским хозяйством и чувствительны к загрязнению водной и воздушной среды:

$$\begin{aligned} \text{WOOD}(t+1) &= \text{WOOD}(t) \vee \neg \text{AGRY}(t), \\ \text{WOOD}(t+1) &= \text{WOOD}(t+1) \vee \neg \text{POLL}(t). \end{aligned}$$

Состояние почв определяется климатическими условиями, а развитие сельского хозяйства может привести к истощению почв. Для восста-

новления качеств почвы требуются, как и для развития всего сельского хозяйства, соответствующие инвестиции и время (C_AGRY).

Будем считать, что общее производство пищевых продуктов, необходимое для повышения уровня жизни населения, складывается из результатов деятельности сельского хозяйства и вылова рыбы:

$$\begin{aligned} \text{SOIL}(t+1) &= \text{SOIL}(t) \vee \neg \text{AGRY}(t), \\ \text{AGRY}(t+1) &= \text{AGRY}(t) \wedge \text{C_AGRY}, \\ \text{FOOD_PROD}(t+1) &= \text{AGRY}(t) \vee \text{YIELD}(t). \end{aligned}$$

Для определения оптимальных условий эколого-экономической системы (C_BIRTH, C_FOND, C_CLEAN, C_AGRY, C_FISH) в модели предусмотрен специальный блок для определения глобального максимума функции уровня жизни населения (LEV_LIFE). С учетом характера этой функции поиск максимума целесообразно проводить методом релаксации. Каждое значение функции LEV_LIFE находится путем прогона модели из начального состояния, при котором все концепты имеют значение 0.5, до достижения устойчивого состояния за ~100 шагов по времени. Расчеты выполнялись с шагом 0.01 и продолжались до тех пор, пока не отмечалось увеличение функции LEV_LIFE или не достигалось крайнее значение аргумента (0 или 1). Подобная процедура повторялась по всем аргументам до достижения максимума. Признак его достижения – отсутствие положительного приращения функции LEV_LIFE при любых (положительных или отрицательных) приращениях аргументов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Созданная модель оптимального управления эколого-социо-экономической системой водоем–водосбор обладает свойством перехода из произвольного начального состояния в новое устойчивое состояние за ~20 лет (рис. 2). Временной шаг модели – 1 год. Это состояние определяется внешними условиями: климатом (CLIMAT), наличием минеральных ресурсов (MINER) и инвестициями (INVEST) в увеличение рождаемости населения (C_BIRTH), развитие промышленных фондов (C_FOND), совершенствование водочистных сооружений (C_CLEAN), а также в развитие сельского хозяйства и рыболовство (C_AGRY, C_FISH). В модели менялись только внешние условия, а управляющие воздействия выбирались таким образом, чтобы максимально обеспечить условия жизни населения. Результаты исследования представлены в табл. 1 и 2; рис. 3, 4.

Сценарий 1 развития изучаемой эколого-социо-экономической системы соответствовал суровым климатическим условиям (температура приземного слоя воздуха над территорией водо-

Таблица 1. Оптимальные воздействия на эколого-экономическую систему при различных вариантах климатических условий (CLIMAT), запасов минеральных ресурсов (MINER) и инвестиций (INVEST), которые обеспечивают максимально высокий уровень жизни населения (LEV_LIFE)

| | Сценарии | | | | | | | | | |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| CLIMAT | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 1.0 |
| MINER | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| INVEST | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| LEV_LIFE | 0.44 | 0.82 | 0.24 | 0.72 | 1.00 | 0.18 | 0.80 | 0.14 | 0.92 | 0.48 |
| C_BIRTH | 1.00 | 1.00 | 0.62 | 0.19 | 0.00 | 0.73 | 0.45 | 0.36 | 0.30 | 0.00 |
| C_FOND | 1.00 | 0.31 | 0.53 | 0.82 | 1.00 | 1.00 | 0.68 | 0.67 | 0.59 | 0.67 |
| C_CLEAN | 1.00 | 0.27 | 0.56 | 0.57 | 0.57 | 0.75 | 1.00 | 0.69 | 1.00 | 0.72 |
| C_AGRY | 0.0 | 0.0 | 0.94 | 0.0 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |
| C_FISH | 0.81 | 0.17 | 0.12 | 0.39 | 0.43 | 0.34 | 0.52 | 0.38 | 0.20 | 0.27 |

Таблица 2. Характеристики устойчивых состояний, в которые приходит эколого-экономическая система при оптимальных воздействиях, приведенных в табл. 1 (MINER – минеральные ресурсы, оставшиеся после 100 лет эксплуатации, POPUL – численность населения, PROD – валовой региональный продукт, WAT_Q – качество воды, AGRY – развитие сельского хозяйства, PHYTO – продукция фитопланктона, ICHTIO – ихтиомасса промысловых рыб, YIELD – вылов рыбы)

| | Сценарии | | | | | | | | | |
|--------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| MINER | 0.0 | 0.17 | 0.0 | 0.10 | 0.06 | 0.0 | 0.17 | 0.0 | 0.10 | 0.06 |
| POPUL | 0.38 | 0.39 | 0.61 | 0.60 | 1.00 | 0.34 | 0.39 | 0.60 | 0.61 | 1.00 |
| PROD | 0.38 | 0.10 | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.04 | 0.10 | 0.06 | 0.12 | 0.15 |
| WAT_Q | 0.62 | 0.60 | 0.39 | 0.39 | 1.00 | 0.62 | 0.61 | 0.39 | 0.39 | 1.00 |
| AGRY | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |
| PHYTO | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 0.15 |
| ICHTIO | 0.11 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.11 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.19 |
| YIELD | 0.09 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.08 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |

сбора ниже климатической нормы за 1960–1990 гг.), отсутствию запасов минерального сырья в регионе, наличию существенных инвестиций в развитие региона на уровне 0.5. Оптимизация управляющих воздействий показала, что важно добиться средних условий жизни населения ($LEV_LIFE = 0.44$) ценой максимально возможного развития производственных фондов и максимальных вложений в увеличение рождаемости населения и здравоохранение. При этом предполагалась полная очистка промышленных и бытовых стоков. Результаты моделирования подтверждают, что следует отказаться от развития сельского хозяйства, в первую очередь – из-за суровых климатических условий региона. А инвестиции в развитие рыболовства – важного занятия местного населения Беломорья [24] – следует поддерживать на высоком уровне, не доводя его до максимального, чтобы избежать необратимого

подрыва популяции промысловой рыбы. Устойчивая (мало меняющаяся) численность населения при этом варианте ожидается ниже средней (табл. 1).

Условия сценария 2 повторяют условия сценария 1, но отличаются наличием существенных запасов минерального сырья ($MINER = 1$). При этом возможно существенное улучшение условий жизни населения ($LEV_LIFE = 0.44$). “Сырьевое изобилие” позволяет снизить промышленное производство по сравнению со сценарием 1. Сокращаются расходы на очистные сооружения для поддержания допустимого уровня состояния окружающей среды. Сельское хозяйство, как и в сценарии 1, остается нерентабельным, а выловы рыбы несколько увеличиваются. Однако следует заметить, что сценарий 2 неустойчив во времени. По мере исчерпания минерального сырья в реги-

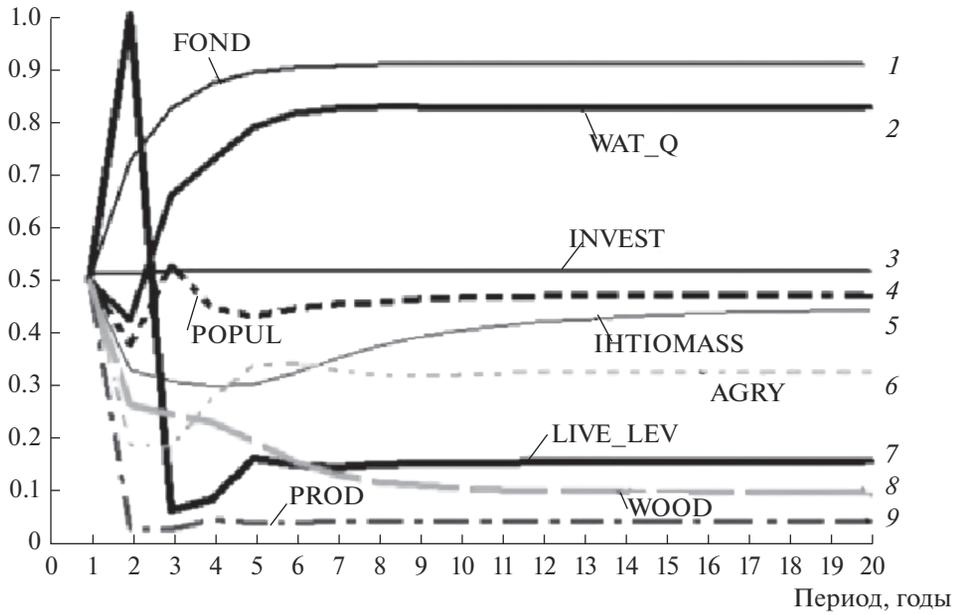


Рис. 3. Динамика системы по сценарию 1 (CLIMAT = 0.1, MINER = 0, INVEST = 0.5). 1 – инвестиции в развитие промышленных фондов, 2 – качество воды, 3 – суммарные инвестиции, 4 – численность населения, 5 – ихтиомасса промысловых рыб, 6 – интенсивность сельского хозяйства, 7 – уровень жизни населения, 8 – степень сохранности территорий, не используемых поселениями, промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, 9 – валовой продукт.

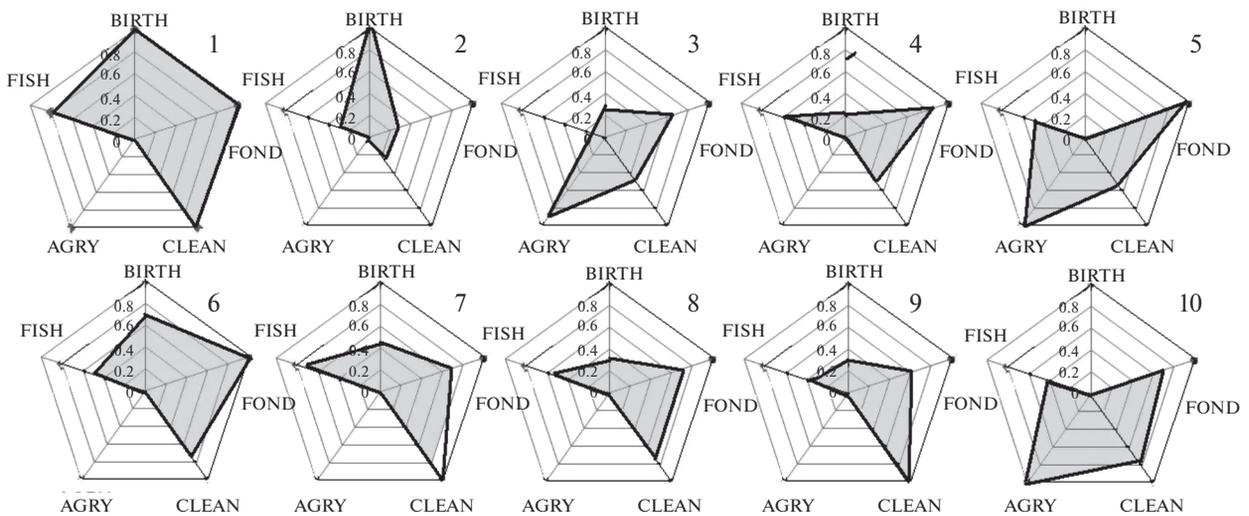


Рис. 4. Диаграммы оптимальных воздействий на эколого-экономическую систему Беломорья. Климатические условия, запасы минерального сырья и инвестиции приведены в табл. 1. Цифрами показаны номера сценариев.

оне состояние эколого-экономической системы начинает соответствовать сценарию 1.

Сценарий 3 соответствует средним климатическим условиям (CLIMAT = 0.5). В этом сценарии рассматривается вариант отсутствия запасов минерального сырья. Но можно поддержать уровень жизни населения при помощи развития сельского хозяйства. Промышленное производство сокращается, хотя численность населения возрастает. Уловы промысловой рыбы увеличиваются по сравнению с предыдущими сценариями, но

уровень жизни населения при этом остается ниже среднего.

Условия сценария 4 повторяют условия сценария 3, но при наличии запасов минерального сырья. Уровень жизни населения существенно повышается (LEV_LIFE = 0.72), что позволяет в этом случае не развивать сельское хозяйство. Вылов рыбы сохраняется на высоком уровне. Стабильность такого состояния, как и в сценарии 2, сохраняется до исчерпания запасов минерального сырья.

Сценарий 5 характеризуется самыми благоприятными климатическими условиями, т.е. потеплением климата, которое наблюдается в настоящее время и прогнозируется на ближайшие 30 лет [31]. При этом сценарии возможно достичь наивысшего значения уровня жизни населения ($LEV_LIFE = 1.0$). Сельское хозяйство также интенсивно развивается, но в ущерб сохранению окружающей среды. Однако расходование запасов минерального сырья происходит интенсивнее, чем в сценариях 2, 4, и со временем система становится неустойчивой.

Сценарии 6–10 (табл. 2; рис. 4) соответствуют случаям, когда инвестиции в развитие региона существенно ограничены. При этих сценариях уровень жизни населения снижается. Во всех случаях, кроме ситуации с благоприятным климатом (потепление, сценарий 10), сельское хозяйство оказывается нерентабельным. Степень загрязнения окружающей среды в сценариях 8 и 9 также оказывается низким. Больше всего это заметно при сценарии 8 (аналог сценария 3 по климатическим условиям и запасам сырья), когда уровень жизни населения снижается до минимума ($LEV_LIFE = 0.14$).

ВЫВОДЫ

С помощью когнитивной модели оптимального управления эколого-социально-экономической системой водоем–водосбор выполнены 10 экспериментов с разными сценариями изменения климата, уровня инвестиций в производственные фонды, охрану окружающей среды (в данном случае в очистку промышленных и бытовых стоков), развитие сельского хозяйства, рыбную промышленность — одно из важнейших занятий местного населения.

Использованный подход на настоящем этапе представляет методический интерес, а результаты, полученные на когнитивной модели, применимы при создании систем поддержки принятия решения, но не для инженерных расчетов, и для поиска оптимальной стратегии природопользования. Предложенные разработки дают возможность на качественном уровне подойти к решению проблемы оптимального управления развитием регионов бассейна Белого моря. Но при этом необходимо иметь в виду, что важный смысл настоящего исследования состоит не в том, чтобы давать прогнозы развития экономики, социальной сферы, окружающей среды, а показать возможность модельного подхода к рассматриваемой ситуации в комплексе проблем. Решается многокритериальная задача определения такого режима управляющих воздействий, который обеспечил бы достижение максимальной величины некоторого выбранного критерия, которым в

данном случае является уровень жизни населения в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрикосов Н.М., Аверкин А.Н., Ефимова Н.А.* Когнитивная экономика: методологические основы // Четвертая международ. конф. по когнитивной науке. Томск, 2010. С. 115–116.
2. *Альбертин С.В.* Когнитивное моделирование как способ научного познания и творчества // Гуманит. науч. исследования. 2016. № 8 // URL <http://human.snauka.ru/2016/08/1629289>.
3. Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Терзевика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 349 с.
4. *Власов М.П., Шапиро П.Д.* Моделирование экономических процессов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. С. 406.
5. *Горелова Г.В., Рябцев В.Н.* Когнитивное моделирование как инновационный подход к исследованию проблем геополитических регионов // Тр. XXI Международ. конф. “Проблемы управления безопасностью сложных систем” / Под ред. Н.И. Архиповой, В.В. Кульбы. М.: Изд-во РГГУ, 2013. С. 320–324.
6. *Гузинаров М.Б., Ильясов Б.Г., Вакиева Е.Ш., Герасимова И.Б.* Когнитивная модель формирования показателя уровня жизни // Вестн. УГАТУ. 2013 Т. 17. № 2 (53). С. 216–226.
7. *Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.* Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Науч. мир, 2010. 232 с.
8. *Дрогушева А.К.* Возможности когнитивного моделирования в управлении региональным потенциалом // Новая наука: современное состояние и пути развития. 2016. № 4–1. С. 109–113.
9. *Дружинин П.В., Филатов Н.Н., Морошкина М.В., Дерусова О.В., Поташева О.В.* Моделирование и пространственный анализ эколого-экономического состояния водосбора Белого моря // ИНТЕРКАРТО. 2018. № 24. С. 130–142.
10. *Загородникова Т.* Об уровне жизни населения // Вопросы статистики. 1998. № 6. С. 14–17.
11. *Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Виноградова В.В.* Районирование России по природным условиям жизни населения. М.: ГЕОС, 2012. 156 с.
12. Индикаторы устойчивого развития для Санкт-Петербурга. СПб.: Правительство Санкт-Петербурга, Санкт-Петербургский науч. центр, 2006. 16 с.
13. *Клюшников В.Ю., Канаева Е.Н.* Когнитивная модель экологических последствий деятельности космодрома // Двойные технологии. 2014. № 3 (68). С. 14–18.
14. *Колмакова И.Д., Байкова Е.И., Колмакова Е.И.* Экономико-математические методы оценки планирования уровня жизни населения региона // Региональная экономика. Теория и Практика. 2017. Т. 15 (5). С. 928–936.
15. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р.* Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-

- ориентированный подход). М.: Экономика, 2013. 295 с.
16. *Максименко В.П., Антонов Н.П.* Количественные методы оценки рыбных запасов // Бюлл. “Вопросы рыболовства”. М., 2004. 256 с.
 17. *Матвеев В.Д.* Макроэкономика. СПб., 2001. 230 с.
 18. *Менишуткин В.В.* Искусство моделирования. Физиология, экология, эволюция. Петрозаводск, 2010. 410 с.
 19. *Менишуткин В.В.* Когнитивные модели в лимнологии. СПб.: Нестор-История, 2019. 146 с.
 20. *Менишуткин В.В., Минина Т.Р.* Когнитивная модель взаимодействия человеческого общества с экологической системой водоема // Сб. науч. статей ИПРЭ РАН “Региональная экономика и развитие территорий”. 2017. Т. 1 (11). С. 160–167.
 21. *Менишуткин В.В., Филатов Н.Н.* Модель оптимального управления эколого-социо-экономической системой Беломорья // Лимнология и Океанология. № 9. 2019. С. 145–154. <https://doi.org/10.17076/lim1120>
 22. *Менишуткин В.В., Филатов Н.Н., Дружинин П.В.* Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 4–17. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-4-17>
 23. *Миллер Дж.* Когнитивная революция с исторической точки зрения // Вопросы психологии. 2005. № 6. С. 104–109.
 24. *Плюснин Ю.М.* Поморы. Новосибирск: НГУ, 2003. 143 с.
 25. *Путилов В.А., Горохов А.В.* Системная динамика регионального развития. Мурманск: Позоре, 2002. 308 с.
 26. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2016 // М.: Росстат, 2018. 1162 с.
 27. *Стасенков В. А.* О промысле наваги // Вест. рыбохоз. науки. 2016. Т. 3. № 2 (10). С. 18–26.
 28. *Татаркин А.И., Логинов В.Г.* Оценка природно-ресурсного и производственного потенциала северных и арктических районов: состояние и перспективы использования // Проблемы прогнозирования. 2015. № 1. С. 33–44.
 29. *Филатов Н.Н., Литвиненко А.В., Богданова М.С.* Водные ресурсы северного экономического района России: состояние и использование // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 502–514. <https://doi.org/10.7868/S0321059616050059>
 30. *Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Дружинин П.В.* Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы Белое море–водосбор // Лимнология, Океанология. 2019. № 9. С. 30–50. <https://doi.org/10.17076/lim1117>
 31. *Филатов Н.Н., Толстиков А.В., Богданова М.С., Менишуткин В.В.* Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбор // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 18–29.
 32. Cognitive Economics. An Interdisciplinary Approach / Eds Bourguine P., Nadal J-P. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 479 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24708-1>.
 33. IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team / Eds R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
 34. *Ross D.* Economic theory and cognitive science: Micro-explanation. A Bradford Book. MIT Press. 2019. 454 p.
 35. *Thérond O., Sibertin-Blanc, Romain Сю, Romain L., Gaudio B., Balestrat M., Hong Yi, Louail T., Nguyen Van Bai and Panzoli D., Sanchez-Perez J-M., Sauvage S., Taillandier P., Vavasseur M., Mazzega P.* Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA highresolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems // 7th Int. Environ. Modelling Software Soci. (iEMSs). San Diego, 2014. 120 p.