

Моделирование эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора

В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов^{2, ✉}

¹ Институт проблем региональной экономики РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия
✉ nfilatov@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г., после доработки – 08.05.2020 г.

Цель. Разработка когнитивной модели эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора (Беломорье) – цель данной работы. В отличие от предыдущих разработок для региона новая когнитивная модель эколого-социо-экономической системы имеет иерархическую структуру, включающую пять подмоделей, объединенных общей системой управления. Модель предназначена для прогностических оценок на качественном уровне происходящих изменений сложной системы при различных сценариях природопользования и изменения климата. Модель дает возможность определения важных для достижения устойчивого развития региона целевых показателей, направленных на оценку возможностей повышения уровня жизни населения, рационального использования и охраны окружающей среды, развитие социальной сферы Беломорья. Результаты могут служить основой для построения моделей, необходимых для разработки систем поддержки принятия управленческих решений.

Методы и результаты. Когнитивная модель Белого моря рассматривается как инструмент для синтеза разнородной информации о сложной эколого-социо-экономической системе. Применяется концептуальное моделирование и математический аппарат размытой логики. В отличие от традиционных когнитивных моделей в настоящей предусматривается изменение переменных во времени за 100 лет, что позволяет описать связь агентов взаимодействия и охарактеризовать механизмы их взаимной адаптации. Временной шаг модели принят равным одному году. Создано необходимое информационное обеспечение: геоинформационные системы, базы данных, комплексный электронный и бумажный атласы Белого моря и его водосбора, оригинальные 3D математические модели термогидродинамики и экосистемы моря, изучены закономерности изменений климата, гидрологических условий и ресурсов рыболовства – основного занятия местного населения – поморов, используются модели для оценки состояния и прогноза развития экономики региона.

Выводы. Создана новая когнитивная модель эколого-социо-экономической системы Беломорья, основанная на иерархическом принципе. Разработанные подмодели относятся к различным областям знания (экономика, демография, океанология, почвоведение, агрофизика). Продемонстрирована динамика элементов модели за 100 лет, показано, что экономические параметры мало зависят от изменений климата, в то время как эти изменения оказывают заметное влияние на уровень жизни населения и экосистему Белого моря. Они проявляются в колебаниях температуры воды, биомассы фито- и зоопланктона, вылова рыбы, но мало заметны в изменениях бентоса. Показана зависимость оттока населения Беломорья от размеров валового регионального продукта, наличия производственных фондов и качества воды.

Ключевые слова: окружающая среда, население, экономика, когнитивная модель, прогнозирование, климат, Белое море, водосбор

Благодарности: финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН) и Института проблем региональной экономики РАН (ИПРЭ РАН) (АААА-А19-119-021390164-1). Авторы благодарят Т. Р. Минину (ИПРЭ РАН) за очень большую помощь при подготовке статьи, Л. Е. Назарову (ИВПС КарНЦ РАН) за полезные замечания, М. С. Богданову (ИВПС КарНЦ РАН) за помощь при подготовке рисунков.

© Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., 2021

Для цитирования: Мениуткин В. В., Филатов Н. Н. Моделирование эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 113–131. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-113-131

Modeling the Ecological-Socio-Economic System of the White Sea and its Watershed

V. V. Menshutkin ¹, N. N. Filatov ², ✉

¹ Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

² Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

✉ nfilatov @ rambler.ru

Purpose. The work is aimed at developing a cognitive model of the ecological-socio-economic system of the White Sea and its watershed (called for short Belomorje). Unlike the previously developed cognitive models for the region, the new model of the system has a hierarchical structure including five sub-models united by a common management system. The model is intended for obtaining prognostic qualitative assessments of the transformations ongoing in a complex system under various scenarios of nature management and climate change. The model makes it possible to determine different targets, which, in their turn, permit to assess the possibilities of improving the population living standards, the environment rational use and protection, and development of the White Sea region social sphere. These factors constitute an important foundation for achieving sustainable development of the region. The results can serve a basis for constructing a system of quantitative models required to develop the management decision support systems.

Methods and Results. The cognitive model of the White Sea is considered to be a tool for synthesizing heterogeneous information about a complex ecological-socio-economic system. The conceptual modeling and the mathematical apparatus of continuous or fuzzy logic are applied. Unlike the traditional cognitive models, the new one implies the variables' change in time over 100 years. This allows us to describe the relationship between the interaction agents, and to characterize the mechanisms of their mutual adaptation. The time step in the model is preset to be one year. Development of the cognitive models for the White Sea region was supported by the following information: geographic information systems, databases, integrated electronic and paper atlases of the White Sea and its watershed area, original 3D mathematical models of the sea thermohydrodynamics and ecosystem. The patterns of climate change, hydrological conditions and fishing (basic occupation of local population – the Pomors) were studied. At that, the models both for assessing the regional economy state and for forecasting its development are used.

Conclusions. A new cognitive model of the White Sea region ecological-socio-economic system was created based on the hierarchical principle. The developed sub-models relate to various fields of knowledge: economics, demography, oceanography, soil and agrophysics. Dynamics of the model elements over 100 years was demonstrated. Besides, it was shown that with the quasi-cyclic climate fluctuations, the economic parameters change insignificantly, whereas they have a noticeable impact upon the population living standards and the White Sea ecosystem. The demonstrated features resulted from the climate change effects upon the White Sea ecosystem are manifested in the fluctuations of water temperature, phyto- and zooplankton biomass and fishing, but the changes in benthos are hardly noticeable. Dependence of the White Sea region population outflow upon the gross regional product size, availability of production facilities and water quality is shown. Water quality in the region increases, unfortunately, not due to the investments in water treatment, but because of the pollution decrease resulted from the population and production shrinkage.

Keywords: environment, population, economy, cognitive model, forecasting, climate, White Sea, watershed

Acknowledgments: The research was financially provided by the federal budget intended for implementing the state task to the Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences and the Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences (AAAA-A19-119-021390164-1). The authors are grateful to T.R. Minina (IRES RAS) for her valuable

assistance in preparing the article, L.E. Nazarova (NWPI, KarRC RAS) for her useful comments, and M.S. Bogdanova (NWPI, KarRC RAS) for her help in preparing the figures.

For citation: Menshutkin, V.V. and Filatov, N.N., 2021. Modeling the Ecological-Socio-Economic System of the White Sea and its Watershed. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(1), pp. 104-121. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-104-121

Введение

Белое море и его водосбор (Беломорье) – богатый водными, биологическими, транспортными, энергетическими и минеральными ресурсами регион. Водосбор Белого моря площадью 717,7 тыс. км² составляет более 10% Арктической зоны Российской Федерации, включает в себя значительную часть территории 7 субъектов РФ: Мурманской, Архангельской, Вологодской областей, Республики Карелия и Республики Коми, а также небольшую часть Кировской области и Ненецкого автономного округа [1]. До 1991 г. Белое море было подвержено сильному загрязнению, достаточно активно использовались рыбные и минеральные ресурсы, развивалась марикультура, водный транспорт. Но после 1991 г. в Беломорье стали наблюдаться кризисные явления в социально-экономической сфере, такие как депопуляция – население региона за 30 лет уменьшилось более чем на 1 млн человек, произошло существенное сокращение объемов промышленного рыболовства, рыборазведения, марикультуры [2, 3]. Сложные процессы в социально-экономической сфере региона обусловлены не оскудением природных ресурсов, а особенностями функционирования экономики субъектов РФ, несовершенством законодательной базы, регламентирующей экономическую и природоохранную деятельность. В период реформ 90-х годов XX в. отмечалось резкое падение инвестиций в регион, уменьшение валового регионального продукта (ВРП). Состояние моря (качество вод, рыбные ресурсы) также оказывает влияние на социально-экономические процессы, характерные для Беломорья, и наоборот – процессы на водосборе, площадь которого в 8 раз превосходит площадь акватории Белого моря, воздействуют на экосистему моря.

Опыт исследования сложных эколого-социо-экономических систем имеется для Черного моря и его прибрежной зоны [4]. Для описания процессов использовался системный подход, при котором экономические цели потребления биоресурсов ставились в зависимость от экологического состояния морской среды. Были рассмотрены примеры управления балансом эколого-социо-экономических процессов с использованием интегральных критериев биоразнообразия и уровня загрязнения морской среды. Другой подход исследования социо-экономических систем с использованием когнитивных моделей был применен для оценки возможностей устойчивого развития Черноморского, Кавказского, Каспийского субрегионов [5]. В работе [6] оценивались основные воздействия климата на геофизические параметры Северного Ледовитого океана, которые влияют прямо и/или косвенно на социально-экономические процессы в Арктике (такие как добыча и эксплуатация ресурсов, условия проживания населения, транспорт), важные для устойчивого развития ее регионов.

Для изучения сложной эколого-социо-экономической системы Белое море – водосбор были разработаны когнитивные модели [7–9]. В первых когни-

тивных моделях такой системы в качестве основной целевой функции рассматривалась возможность обеспечения наилучшего развития всех субрегионов (субъектов РФ), входящих в водосбор, для устойчивого развития региона [7]. Оценивалось соотношение величины инвестиций в развитие субрегионов и демографических характеристик населения для достижения наилучших (комфортных) условий проживания. В работе [8] была разработана когнитивная модель для изучения возможности повышения уровня жизни населения с использованием рыболовства – традиционного занятия местного населения – поморов. В третьей модели для этого региона [9] решалась многокритериальная задача определения такого режима управляющих воздействий, который бы смог обеспечить максимальный уровень жизни населения региона при разных сценариях состояния экономики и изменения климата. В отличие от предыдущих разработок новая модель эколого-социо-экономической системы Белого моря и его водосбора имеет иерархическую структуру, включающую в себя 5 подмоделей, объединенных общей системой управления. В настоящей работе предлагается модель, которая представляет собой развитие эколого-экономических когнитивных моделей [7, 10, 11]. Модель можно использовать для разных целей управления, связанных, например, с повышением уровня жизни населения, охраной окружающей среды, развитием различных отраслей экономики.

Материалы и методы

Когнитивная модель Беломорья рассматривается как инструмент синтеза разнородных сведений о сложной эколого-социо-экономической системе для разработки подходов, которые могут представлять интерес для систем поддержки принятия решений [12]. Применяется концептуальное моделирование и математический аппарат размытой логики [13, 14]. В отличие от традиционных когнитивных моделей в настоящей предусматривается изменение переменных во времени за 100 лет, что позволяет описать связь агентов взаимодействия и охарактеризовать механизмы их взаимной адаптации. Временной шаг модели принят равным одному году. Для климатической и социально-экономической частей модели такая величина временного шага представляется вполне естественной, но для экосистемной части (поскольку не рассматриваются даже сезонные изменения) это достаточно грубое приближение, с которым приходится считаться во избежание чрезмерного усложнения всей модели.

Из электронного атласа, баз данных и геоинформационной системы Беломорья, разработанной в ИВПС КарНЦ РАН [15, 16], выбирались постоянно обновляемые данные для характеристики климата (температура воздуха, осадки, испарение), стока рек и различных социо-экономических параметров (ВРП, инвестиции, сбросы загрязненных вод, численность и состав населения, вылов рыбы и др.), данные для характеристики изменения экосистемы моря (температура и соленость воды, биогены, фито- и зоопланктон и др.), полученные согласно измерениям и результатам расчетов на 3D-моделях экосистемы [1, с. 303–331; 17], а также сведения для оценки состояния и прогноза развития экономики [2, 18].

Все переменные модели описываются при помощи действительных чисел в диапазоне от 0 до 1. Содержательно это интерпретируется как изменение мо-

делируемой величины между ее возможными максимальными и минимальными значениями. Например, температура поверхности воды в Белом море не выходит из диапазона $-1 \dots +25^{\circ}\text{C}$ [5], а численность населения регионов Беломорья, по оценкам [18], гипотетически может составлять от нуля до шести миллионов человек.

В первой когнитивной модели для Беломорья [7] рассматривались изменения гидрологических условий экосистемы, биогенной нагрузки, фито- и зоопланктона, рыбных запасов. При инерционном сценарии развития экономики, который предусматривает сохранение внешних воздействий на систему, какими они были до 2018 г., отмечается стабилизация уровня загрязнения моря, сохранение рыбных ресурсов. Но при существенном увеличении инвестиций в регион вместе с ростом ВРП возрастает и объем загрязнений, поступающих в море, а также сокращаются рыбные ресурсы. В модели водной экосистемы представлены процессы продуцирования органического вещества и его передача по трофической сети водоема до уровня биомассы популяции промысловой рыбы в море.

Управляющее воздействие климата на систему Беломорья включает описание изменений среднегодовой температуры воздуха, объема атмосферных осадков, суммарного испарения и суммарного среднегодового стока рек в Белое море [19].

Действительно, определение состояния концептов когнитивной модели в диапазоне от 0 до 1 позволяет рассматривать их как вероятности некоторых событий [20]. Примененный в настоящей работе метод когнитивного моделирования базируется на вероятностной модели [21]. Например, в подмодели Водная экосистема (рис. 1) состояние возрастной группы рыб определяется по состоянию младшей группы в предыдущий год и процессами смертности и роста. Поскольку вероятность существования группы рыб и вероятность выживания являются событиями совместимыми, то применяется формула умножения вероятностей. Использование математического аппарата вероятностной логики делает процесс создания и программной интерпретации модели более простым.

Когнитивное моделирование обладает специфическими свойствами, которые необходимо учитывать как при создании моделей, так и при оценке получаемых результатов. В отличие от традиционных моделей экосистем [22] когнитивные модели не используют принципы законов сохранения. Это относится не только к законам сохранения вещества и энергии в моделях водных и почвенных сред или биологических объектов, но и к экономике. Данный факт, естественно, обедняет возможности когнитивного моделирования, хотя позволяет рассматривать как единое целое соединение объектов различной природы, как это сделано в настоящей работе.

Функционирование модели начинается с задания изменения климатических условий на весь период ее работы, т. е. на 100 лет, начиная с 1960 г., захватывает достаточно хорошо изученное состояние всей системы и обеспечивает возможность перехода к прогнозированию возможных состояний эколого-социо-экономической системы Беломорья.

Модель имеет иерархическую структуру, включающую в себя 5 подмоделей, объединенных общей системой управления (*Control*) (рис. 1).

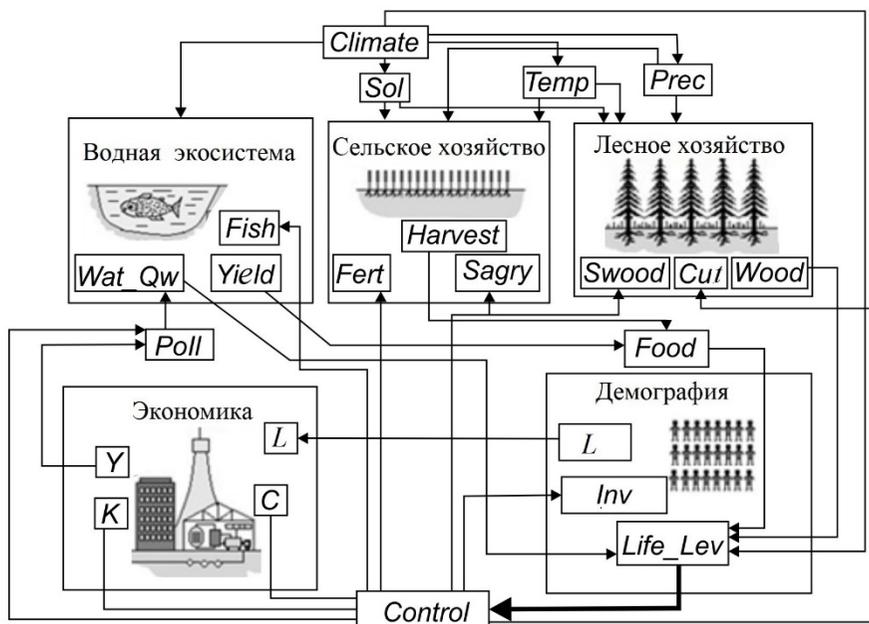


Рис. 1. Общая блок-схема эколого-социо-экономической модели региона: Y – валовой региональный продукт; K – капитал, или производственные фонды; L – численность работоспособного населения; C – потребление; Inv – инвестиции. Другие условные обозначения приведены в тексте
Fig. 1. General block diagram of the regional ecological-socio-economic model: Y – gross regional product; K – capital or production facilities; L – number of working population; C – consumption; Inv – investment. The other conventions are given in the text

Подмодель Экономика предназначена для определения ВРП (обозначим как Y) и связанных с ним затрат на процесс очистки сточных вод в регионе ($Poll$) – важного показателя состояния окружающей среды. ВРП также расходуется на обеспечение определенного уровня жизни населения ($Life_Lev$) и на сопряженные подсистемы – рыболовство ($Fish$), внесение удобрений для развития сельского хозяйства ($Fert$) и внутренние нужды, такие как затраты на развитие производственных фондов (K).

Подмодель Демография обеспечивает подмодель Экономика сведениями о численности населения, в особенности трудоспособного в возрасте от 18 до 60 лет (L). В этой подмодели осуществляется определение уровня жизни населения ($Life_Lev$), величина которого является целевой функцией оптимального управления всей изучаемой системой.

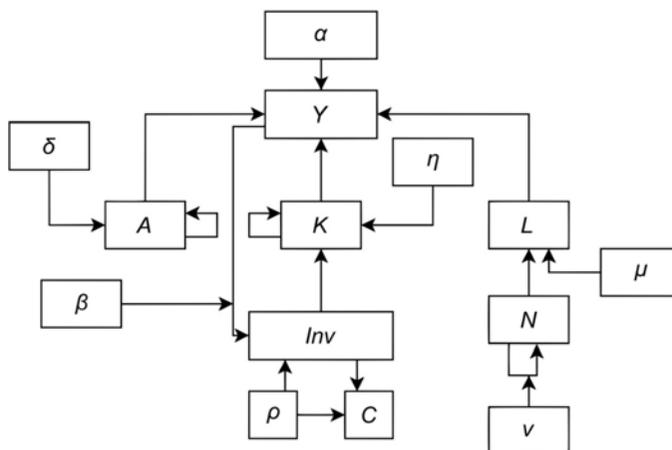
Подмодель Водная экосистема ответственна за имитацию процессов продуцирования органического вещества и его передачу по трофической сети водоема до уровня биомассы популяции промысловой рыбы в море. В качестве основных промысловых видов Белого моря рассмотрим сельдь и навагу [3]. Популяции этих рыб под воздействием рыболовства ($Fish$) обеспечивают получение определенного вылова ($Yield$), который является компонентом питания населения ($Food$). Состояние водных экосистем зависит от изменений климата ($Climate$) и загрязнения водоема промышленными и бытовыми отходами ($Poll$). Качество воды водоема (Wat_Qw) существенно влияет на уровень жизни населения региона ($Life_Lev$).

Подмодель Сельское хозяйство формирует сведения о сельскохозяйственной деятельности в регионе, в частности, определяет величину урожая (*Harvest*). Состояние сельского хозяйства, или агросистем, как и лесного хозяйства, определяется климатом (солнечная радиация (*Sol*)), температурой воздуха (*Temp*) и осадками (*Prec*). Существенной характеристикой подмодели является величина площадей, занимаемых сельскохозяйственными угодьями (*Sagry*), которая находится в конкурентных отношениях с площадями, занятыми лесами и населенными пунктами региона.

Подмодель Лесное хозяйство осуществляет выработку информации о реакции лесной системы на изменения климатических условий (*Sol, Temp, Prec*), об интенсивности вырубке (*Cut*), загрязнении окружающей среды (*Poll*) и сокращении площадей, занимаемых лесами, под влиянием развития сельского хозяйства и расширения площади урбанизированных территорий (*Swood*).

Блок управления всей системой (*Control*) направлен в настоящем случае на повышение уровня жизни населения (*Life_Lev*) путем инвестиций в промышленность, сельское и лесное хозяйство, рыболовство и рыборазведение, в природоохранные мероприятия.

В качестве подмодели Экономика выбрана модель Солоу – Свана, которая представляет собой неоклассическую модель экономического роста, предложенную Робертом Солоу [см. 23]. Она основана на производственной функции Кобба – Дугласа и показывает зависимость объема производства от создающих его факторов производства – труда и капитала [23]. При этом используется вариант с дискретным временем, а моделирующий алгоритм выполнен в виде когнитивной модели. Когнитивный граф подмодели Экономика приведен на рис. 2.



Р и с. 2. Когнитивный граф подмодели Экономика: *Y* – валовой региональный продукт; *A* – уровень технического прогресса; *K* – капитал, или производственные фонды; *L* – численность работоспособного населения; *N* – численность населения; *C* – потребление; α – доля капитала в формуле Кобба – Дугласа; β – коэффициент прямых затрат; δ – коэффициент технического прогресса; η – коэффициент амортизации фондов; ρ – норма накопления; μ – доля работоспособного населения; v – коэффициент роста населения

Fig. 2. Cognitive graph of the sub-model Economics: *Y* – gross regional product; *A* – level of technological progress; *K* – capital or production facilities; *L* – number of working population; *N* – number of population; *C* – consumption; α – portion of capital in the Cobb–Douglas formula; β – coefficient of direct costs; δ – coefficient of technological progress; η – depreciation coefficient of funds; ρ – accumulation rate; μ – portion of the working population; v – population growth rate

Численность населения в момент времени $t + 1$ определяется исходя из его численности в предыдущий момент t и коэффициента v по соотношению логистического роста:

$$N(t + 1) = N(t) + vN(t)(1 - N(t)).$$

Рабочая сила, или численность работоспособного населения, при полной занятости вычисляется как доля μ от общей численности:

$$L(t) = \mu N(t).$$

Уровень технического прогресса полагается возрастающим в зависимости от коэффициента технического прогресса δ :

$$A(t + 1) = A(t)\delta A(t)(1 - A(t)).$$

Производственная функция, которая представляет собой зависимость произведенного продукта (Y) от производственных фондов (K), рабочей силы (L) и уровня технического прогресса (A), определялась по формуле Кобба – Дугласа [23]:

$$Y(t+1) = A(t)L(t)^\alpha K(t)^{(1-\alpha)},$$

где α – доля капитала в процессе создания продукции.

Как вариант вместо формулы Кобба – Дугласа в модели можно использовать формулу В. Леонтьева, которая представляет собой производственную функцию В. Леонтьева с постоянными пропорциями потребления [23]:

$$Y(t + 1) = \min(K(t), A(t)L(t)).$$

Часть продукции определялась как прямые затраты (коэффициент β), а остаток использовался на инвестиции для пополнения капитала (Inv) и потребление (C). При этом доля инвестиций в производственные фонды (K) регламентировалась коэффициентом ρ :

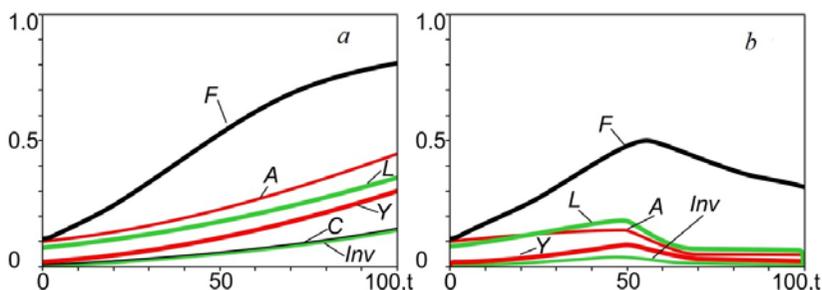
$$Inv(t + 1) = \rho(1 - \beta)Y(t + 1),$$

$$C(t + 1) = (1 - \rho)(1 - \beta)Y(t + 1).$$

Величина производственных фондов в следующий момент времени увеличивалась за счет инвестиций (Inv), но сокращалась за счет амортизации (коэффициент η). Рост скорости амортизации производственных фондов ведет к сокращению продукции:

$$K(t + 1) = (K(t) + Inv(t+1) - K(t)Inv(t+1))(1 - \eta).$$

Приведем пример функционирования подмодели Экономика (рис. 3, а): при постоянных внешних воздействиях (увеличение инвестиций, благоприятный климат и др.), росте численности населения, в особенности работоспособного (L), отмечается рост уровня технического прогресса (A) при увеличении потребления (C); при этом отмечается не очень значительное увеличение валового регионального продукта (Y), инвестиций (Inv) с 0,1 до 0,4, но в целом динамика экономического развития (F) получит значительный рост за 100 лет – с 0,1 до 0,8.



Р и с. 3. Динамика экономического развития (F) при условии роста численности населения и уровня технического прогресса (a), при условии сокращения численности населения, снижения уровня технического прогресса с момента $t = 50$ и последующей стагнации при $t = 50$ лет (b): A – уровень технического прогресса; L – численность работоспособного населения; Y – валовой региональный продукт; Inv – инвестиции; C – потребление; t – время в годах

F i g. 3. Dynamics of the economical development (F) in view of the population and technological progress growth (a), and – the population and technological progress level decrease since $t = 50$ and with subsequent stagnation at $t = 50$ years (b): A – technological progress level; L – number of working population; Y – gross regional product; Inv – investment; C – consumption; t – time (years)

При сокращении численности населения, уменьшении инвестиций в регион снижается уровень технического прогресса и в момент $t = 50$ лет отмечается резкое падение развития экономики региона с 1 (на первом этапе) до 0,5 через 50 лет. В дальнейшем наблюдается падение с 0,5 до 0,3 экономического развития региона в целом в конце 100-летнего периода (рис. 3, b).

Ниже приведены коэффициенты чувствительности как функции величины ВРП (Y) к изменению параметров модели (ρ). Максимальное положительное влияние на экономику оказывает увеличение доли капитал (α) в выражении производственной функции, несколько меньшее значение имеет коэффициент роста численности населения (v):

μ	v	β	ρ	α	δ	η
0,764	0,548	-0,088	0,66	0,708	-0,05	0,099

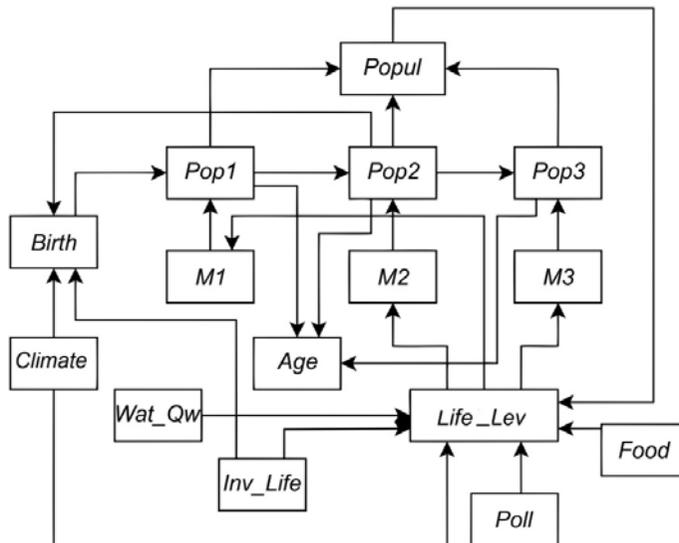
Подобные исследования проводились для того, чтобы убедиться в непротиворечивости поведения подмодели, прежде чем она будет включена в состав полной модели эколого-социо-экономической системы.

Прототипом подмодели **Демография**, которую мы использовали в работе, послужила модель развития мегаполиса [22, с. 334–347] с некоторыми нашими изменениями для стыковки с другими подмоделями системы. На рис. 4 приведен когнитивный граф подмодели **Демография** (*Popul*).

Состояние модели определяется относительной численностью группы лиц в возрасте до 18 лет (*Pop1*), численностью работоспособного населения от 18 до 60 лет (*Pop2*) и численностью пожилых людей старше 60 лет. Возрастная структура популяции представлена в подмодели массивом относительной численности возрастных групп от 0 до 80 лет.

Разделение населения по половому признаку в модели не учитывается. Ежегодное пополнение нулевой возрастной группы *Birth* (t) определяется численностью репродуктивной части популяции (*Pop2*) и коэффициентом рождаемости, который полагался зависящим (достаточно условно) от инвестиций

в систему здравоохранения (*Inv_Life*). Величины коэффициентов смертности определялись для каждой возрастной группы отдельно (*M1*, *M2*, *M3*), причем для группы до 18 лет смертность полагалась минимальной, для группы свыше 60 лет – максимальной. Коэффициенты смертности корректировались общим уровнем жизни населения (*Life_Lev*), его количественная оценка представляется весьма трудной задачей [23–25]. Уровень жизни снижается при высокой численности населения и малых инвестициях в регион, а также при низком качестве воды. Предлагаемый алгоритм вычисления величины (*Life_Lev*) будем считать не более чем первым приближением. Аргументами искомой функции являются: общая численность популяции (*Popul*), инвестиции в сферу здравоохранения (*Inv_Life*), качество воды (*Wat_Qw*), климатические условия (*Climate*), доля поверхности, занятой нетронутой природой, характеризующей состояние окружающей среды (*Wood*), и общее загрязнение среды (в основном воды) (*Poll*). И наоборот, нетронутая природа, хороший климат (таким для Севера будем считать его современное потепление) повышают величину (*Life_Lev*).



Р и с. 4. Когнитивный граф подмодели Демография: *Pop1* – население до 18 лет, *Pop2* – от 18 до 60 лет, *Pop3* – старше 60 лет; *Birth* – рождаемость; *M1* – уровень смертности населения до 18 лет, *M2* – от 18 до 60 лет, *M3* – старше 60 лет; *Age* – средний возраст населения; *Climate* – климатические условия; *Wat_Qw* – качество воды; *Inv_Life* – инвестиции в здравоохранение; *Poll* – загрязнение окружающей среды; *Food* – продукты питания

Fig. 4. Cognitive graph of the sub-model Demography: *Pop1* – population under 18, *Pop2* – population from 18 to 60, *Pop3* – population over 60; *Birth* – birthrate, *M1* – mortality rate of population under 18, *M2* – of population from 18 to 60, *M3* – of population over 60; *Age* – population average age; *Climate* – climatic conditions; *Wat_Qw* – water quality; *Inv_Life* – health care investment; *Poll* – environment pollution; *Food* – food stuffs

Средняя продолжительность жизни (*Life*) вычисляется как

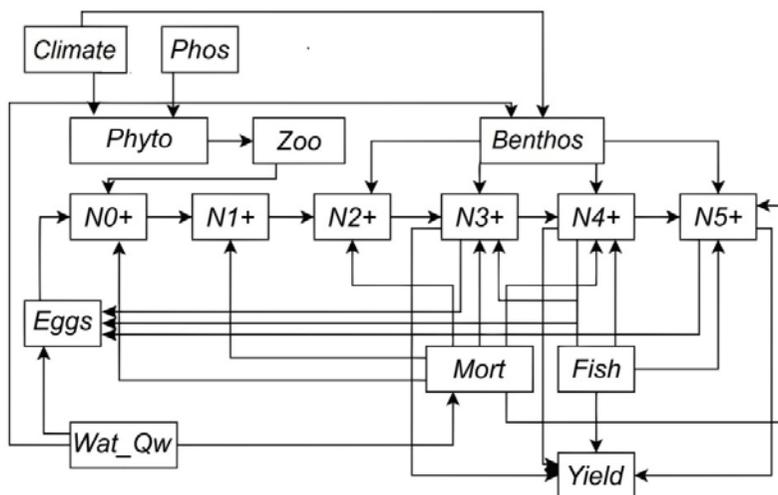
$$Life = \frac{1}{a(0)} \sum_{i=1}^{80} (a(i-1) - a(i))i + a(80)80.$$

Средний возраст населения (Age) определяется по формуле

$$Age = \frac{\sum_{i=0}^{80} a(i)i}{\sum_{i=0}^{80} a(i)}.$$

Возрастной состав популяции соответствует стационарному состоянию при неизменных во времени внешних воздействиях. Рассмотрены также изменения возрастной структуры популяции при периодических квазисинусоидальных изменениях инвестиций и резком изменении условий окружающей среды, на начальном этапе сокращения рождаемости в момент $t = 40$ с последующей стабилизацией, начиная с $t = 60$.

Подмодель Водная экосистема в данном случае представлена одной популяцией промысловой рыбы, состоящей из 6 возрастных групп, и, как в модели [7], величинами, характеризующими биомассу бентоса, фито- и зоопланктона. Важность включения рыболовства в модель обусловлена тем, что оно значительно влияет на условия проживания местного населения – поморов Беломорья. В основу подмодели положены модели экосистем, в которых учитывались принципы сохранения вещества и энергии; эти модели были разработаны ранее для более сложных объектов, например для Ладожского озера и Финского залива [22]. На рис. 5 представлен когнитивный граф подмодели.



Р и с. 5. Когнитивный граф подмодели Водная экосистема: *Climate* – климатические условия; *Phos* – фосфорная нагрузка; *Phyto* – продукция фитопланктона; *Zoo* – биомасса зоопланктона; *Benthos* – биомасса бентоса; *N0+* – сеголетки; *N1+* – годовики; *N2+* – двухлетки; *N3+* – трехлетки; *N4+* – четырехлетки; *N5+* – пятилетки; *Eggs* – пополнение икрой; *Mort* – естественная смертность; *Fish* – условия рыболовства; *Wat_Qw* – качество воды; *Yield* – вылов рыбы

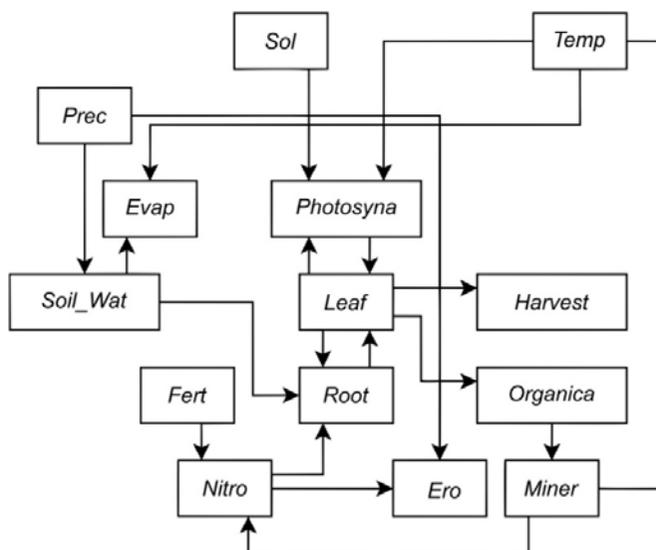
F i g. 5. Cognitive graph of the sub-model Aquatic ecosystem: *Climate* – climatic conditions; *Phos* – phosphorus load; *Phyto* – phytoplankton production; *Zoo* – zooplankton biomass; *Benthos* – benthos biomass; *N0+* – yearlings; *N1+* – yearlings; *N2+* – two-year-olds; *N3+* – three-year-olds; *N4+* – four-year-olds; *N5+* – five-year-olds; *Eggs* – caviar replenishment; *Mort* – natural mortality; *Fish* – fishing conditions; *Wat_Qw* – water quality; *Yield* – fish catch

Рассмотрим далее относительно упрощенную схему подмодели Лесное хозяйство. В общем случае изменение биомассы определяется ростом древесной массы (*Tree_Grow*) (за вычетом массы листьев (*Leaf*), которые полагаются ежегодно опадающими), расходами на отмирание деревьев в результате замедления роста (*Tree_Fall*) и нехваткой воды, необходимой для роста деревьев (*Tree_Dry*). Рост древесной массы определяется разностью между фотосинтезом (*Photosyn*) и дыханием (*Respirato*). Фотосинтез зависит от солнечной радиации (*Sol*), наличия биогенов в почве (*Nitf*), дефицита влаги (*Pws*) и средней температуры воздуха за вегетационный период (*Temp*). Расходы на дыхание деревьев зависят от их биомассы (*Biom*), массы листьев и температурных условий. Масса листьев полагается зависящей от биомассы деревьев.

Органическое вещество как опада листьев, так и почвы (*Organic*) формируется за счет падающих листьев и отмирания древесины (*Tree_Fall* и *Tree_Dry*). Первая составляющая определяется неблагоприятными условиями состояния древостоя при замедлении роста и повышении биомассы леса выше предельных значений, вторая составляющая – дефицитом влаги (*Pws*). Органическое вещество разлагается бактериями (*Miner*) и вымывается в результате эрозии (*Ero*). Интенсивность минерализации органического вещества зависит от содержания воды в почве и температурных условий. Недостаточная влажность почвы или избыток влаги замедляют процесс минерализации органики. Интенсивность эрозионных процессов полагается зависящей от количества атмосферных осадков (*Prec*). Минеральный азот, содержащийся в почве, пополняется за счет минерализации органического вещества и внешних поступлений от атмосферных осадков, фиксации азота и искусственного удобрения (*Dunk*). Кроме этого, минеральный азот выносится из почвы в результате поверхностного и грунтового стока, а также в процессе эрозии почвы (*Ero*).

Рассчитаем динамику всей биомассы (*Biom*), опада (*Organic*), азота в почве (*Ndep*) и вывоза древесины (*Wood*) как при средних величинах всех воздействий, так и при ослаблении солнечной радиации, отсутствии вырубке леса и уменьшении поступления влаги на водосбор. При средних величинах всех воздействий отмечается стабильное изменение всех параметров, начиная со второго года работы системы, а при уменьшении солнечной радиации на 5-й год немного возрастает содержание азота в почве, которое со временем постепенно стабилизируется. При отсутствии вырубке леса, очевидно, сохраняется высокое содержание общей биомассы и биомассы опада при достаточно низком содержании азота в почве. И, наконец, при уменьшении поступления влаги на водосбор отмечаются периодические флуктуации биомассы органического вещества в опаде, а начиная с 5-го года – стабильно низкие значения общей биомассы, содержания азота в почве. И при этом – низкие возможности добычи и вывоза древесины.

Подмодель Сельское хозяйство разработана на основе системы *Agritool*, ранее созданной коллективом авторов Агрофизического института [28]. Но в настоящей модели сделаны существенные упрощения для рассматриваемого региона, обусловленные необходимостью стыковки этого блока с другими подмоделями в системе. Например, система *Agritool* [28] оперирует с суточными и даже часовыми шагами по времени, а в данной модели принят годовой шаг (рис. 7).



Р и с. 7. Когнитивный граф подмодели Сельское хозяйство: *Sol* – солнечная радиация; *Temp* – температура; *Prec* – осадки; *Evap* – испарение; *Photosyna* – фотосинтез; *Leaf* – наземная часть растений; *Soil_Wat* – вода в почве; *Harvest* – урожай; *Fert* – удобрение; *Root* – корни деревьев; *Organica* – опад; *Nitro* – азот в почве; *Ero* – эрозия почвы; *Miner* – бактериальная минерализация

F i g. 7. Cognitive graph of the sub-model Agriculture: *Sol* – solar radiation; *Temp* – temperature; *Prec* – precipitation; *Evap* – evaporation; *Photosyna* – photosynthesis; *Leaf* – terrestrial part of plants; *Soil_Wat* – water in soil; *Harvest* – harvest; *Fert* – fertilizer; *Root* – tree roots; *Organica* – litter; *Nitro* – nitrogen in soil; *Ero* – soil erosion; *Miner* – bacterial mineralization

Основу создания биомассы сельскохозяйственных растений составляет процесс фотосинтеза (*Photosyna*). Литера «а» в конце этого идентификатора добавлена для отличия от аналогичной величины в подмодели Лесное хозяйство. При вычислении применяется закон минимума Либиха с поправкой на температуру:

$$Photosyna = \min(Sol, Leaf)F(Temp).$$

Здесь в качестве ограничения на наличие биогенов играет роль биомасса листьев (*Leaf*), которая увеличивается за счет питания от корней (*Root*) и сокращается в результате усыхания. Рост корневой системы происходит за счет поглощения неорганического азота почвы (*Nitro*). Мертвое органическое вещество (*Organica*) формируется за счет отмирания наземной части растений и минерализуется (*Miner*) в результате деятельности почвенных микроорганизмов с выделением неорганического азота. Запасы этого азота пополняются при внесении в почву удобрений (*Fert*) и сокращаются в результате эрозии почвы (*Ero*). Атмосферные осадки (*Prec*) существенно влияют на скорость эрозийного процесса.

Испарение с поверхности почвы (*Evap*) полагается зависящим от температуры воздуха (*Temp*), влажность почвы (*Soil_Wat*) определяется атмосферными осадками и испарением, урожай (*Harvest*) – достигнутой за вегетационный период биомассой листовой части растений (*Leaf*).

**Коэффициенты чувствительности (эластичности) переменных подмодели
Сельское хозяйство к изменению внешних воздействий (*Sol, Prec, Fert, Temp*)
Coefficients of the Agriculture sub-model variables' sensitivity (flexibility)
to modification of the external impacts (*Sol, Prec, Fert, Temp*)**

Переменные / Variables	<i>Sol</i>	<i>Prec</i>	<i>Fert</i>	<i>Temp</i>
<i>Harvest</i>	0,49	0,87	0,34	0,78
<i>Organica</i>	0,56	0,93	0,37	0,87
<i>Nitro</i>	0,0	0,10	0,51	0,27
<i>Root</i>	0,0	0,0	0,50	0,67
<i>Photosyna</i>	0,92	0,88	0,87	0,98
<i>Miner</i>	0,42	0,83	0,83	0,83

Согласно данным таблицы можно сделать вывод, что в рассматриваемом случае при средних значениях всех внешних воздействий на агроценоз наибольшее влияние на урожай оказывает количество выпавших осадков и температура воздуха.

**Результаты изучения динамики эколого-социо-экономической системы
Беломорья**

Рассмотренные выше 5 подмоделей были соединены в одну систему. Все подмодели работают в едином временном цикле (100 лет), причем передача информации от одной подмодели к другой осуществляется согласно стрелкам на рис. 1. На рис. 8 показана динамика элементов модели за 100 лет при синусоидальных 30-летних (временной масштаб климатической нормы) колебаниях климатических условий ($Climate(t) = 0,2 + 0,8(1 + \sin(0,2t))/2$), которые определяются параметрами *Temp, Sol, Prec*. При этом все остальные внешние воздействия полагаются постоянными во времени. На экономическую часть системы в рассматриваемой модели колебания климата практически не влияют, нет заметных квазипериодических 30-летних колебаний (рис. 8, *a*). В то же время в демографической подмодели (рис. 8, *b*) колебания климата оказывают заметное влияние на уровень жизни населения, который испытывает квазипериодические 30-летние флуктуации.

Такие же заметные колебания отмечаются в водной экосистеме, они проявляются в колебаниях вылова рыбы, фито- и зоопланктона (рис. 8, *c*). Однако для бентоса это не характерно. В параметрах, характеризующих сельское хозяйство (рис. 8, *d*), нет заметных проявлений этих климатических флуктуаций. Неблагоприятными для урожая оказываются только годы с минимальными значениями среднегодовой температуры воздуха.

В качестве примера использования рассматриваемой модели может служить оценка проблем оттока населения из региона, что характерно не только для Беломорья, но и для некоторых регионов Севера и Дальнего Востока России [29]. На рис. 9 показаны последствия изменения численности населения Беломорья при определенных значениях валового регионального продукта, производственных фондов и качества воды.

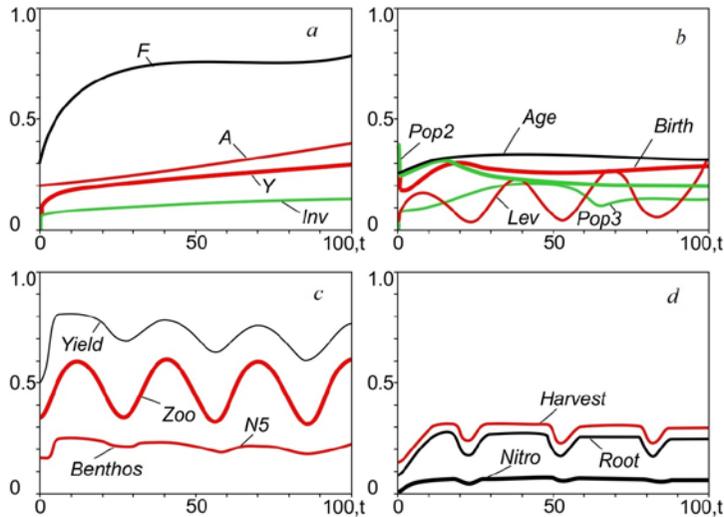


Рис. 8. Влияние характеристик системы региона на синусоидальные изменения климатических условий. Подсистемы: *a* – Экономика; *b* – Демография; *c* – Водная экосистема; *d* – Сельское хозяйство

Fig. 8. Influence of the region system characteristics upon the sinusoidal changes in the climatic conditions. Sub-systems: *a* – Economics; *b* – Demography; *c* – Water ecosystem; *d* – Agriculture

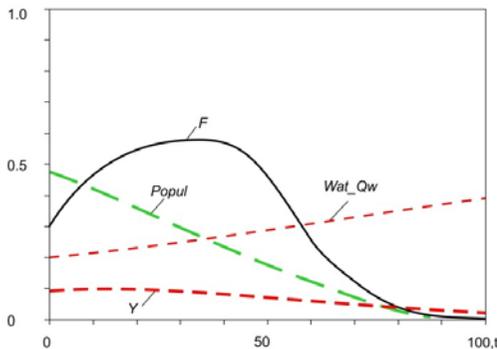


Рис. 9. Изменение во времени численности населения (*Popul*), валового регионального продукта (*Y*), производственных фондов (*F*) и качества воды (*Wat_Qw*)

Fig. 9. Temporal changes of population (*Popul*), gross regional product (*Y*), production facilities (*F*) and water quality (*Wat_Qw*)

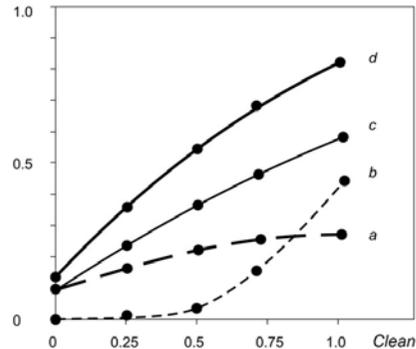


Рис. 10. Зависимость от степени очистки сточных вод (*Clean*) некоторых характеристик системы: уровня жизни населения (*a*), вылова рыбы (*b*), урожая сельскохозяйственных культур (*c*), качества воды (*d*)

Fig. 10. Dependence of some system characteristics on the degree of wastewater treatment (*Clean*): level of the population living standards (*a*), fish catch (*b*), crop harvest (*c*), water quality (*d*)

Если объем ВРП обнаруживает тенденцию к сокращению, то производственные фонды еще некоторое время растут за счет предыдущих накоплений, но затем начинают сокращаться в результате амортизации. Качество воды немного улучшается, но не в результате вложения в очистку, а в связи с уменьшением загрязнения при сокращении производства. И в конечном итоге численность населения в этой ситуации стремится к нулю (рис. 9).

Из управляющих воздействий на систему кроме климата существенное значение имеет степень очистки промышленных и бытовых стоков (*Clean*). На рис. 10 показана реакция некоторых характеристик системы на изменение этой величины – от *Clean* = 0 (полный отказ от очистки стоков) до *Clean* = 1 (их полная очистка). Достаточно очевидным следствием такого изменения является рост показателя качества воды (рис. 10) при увеличении степени очистки. Исследуемое воздействие оказывает наиболее сильное влияние на вылов промысловой рыбы (*Yield*).

При слабой очистке вод вылов рыбы возрастает почти по экспоненте: от 0 при очистке, равной 0,25, до 0,5 при полной очистке воды, но не до единицы. При отсутствии очистки воды на водосборе популяция рыбы со временем перестает существовать. В то же время уровень жизни населения даже при полной очистке некоторое время растет, а затем выходит на стационарный режим, не достигая 0,5 (рис. 10).

Заключение

Создана новая когнитивная модель эколого-социо-экономической системы Беломорья, основанная на иерархическом принципе. Разработаны подмодели, относящиеся к различным областям знания (экономика, демография, океанология, почвоведение, агрофизика). Рассмотрены особенности функционирования каждой из 5 подмоделей. Продемонстрирована динамика элементов модели за 100 лет, показано, что при квазициклических колебаниях климата экономические параметры мало изменяются, в то время как они оказывают заметное влияние на уровень жизни населения, поскольку при определенных условиях создаются более комфортные условия для проживания населения в данном регионе Севера РФ. Такие же заметные колебания при изменении климатической нормы отмечаются и в водной экосистеме Белого моря, они сказываются на изменении температуры воды, вылове рыбы, биомассе фито- и зоопланктона, но мало влияют на изменения бентоса. Сельское хозяйство на водосборе достаточно слабо зависит от изменений климата. Из управляющих воздействий кроме климата существенное влияние на многие элементы водной подсистемы оказывает степень очистки промышленных и бытовых стоков. Наиболее сильное воздействие очистка сточных вод имеет на промысел рыбы. Уровень жизни населения при полной очистке вод возрастает почти вдвое по сравнению с вариантом при отсутствии очистки. Исследование созданной модели далеко не заканчивается приведенными примерами, например, возможен поиск оптимальных воздействий на систему с целью максимального повышения уровня жизни населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Отв. ред. Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2007. 335 с.
2. Моделирование и пространственный анализ эколого-экономического состояния водосбора Белого моря / П. В. Дружинин [и др.] // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : материалы Международной конференции. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2018. Т. 24, ч. 1. С. 130–142. doi:10.24057/2414-9179-2018-1-24-297-309

3. Стасенков В. А. О промысле наваги *Eleginus nawaga* (Koelreuter, 1770) // Вестник рыбохозяйственной науки. 2016. Т. 3, № 2 (10). С. 18–26.
4. Тимченко И. Е., Иващенко И. К., Изумнова Е. М. Управление эколого-экономическими процессами накопления и ассимиляции загрязнений в прибрежной морской среде // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 1. С. 72–88. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-72-88
5. Горелова Г. В., Рябцев В. Н. Когнитивный подход к исследованию геополитических процессов в мировых регионах и когнитивное моделирование их развития (на примере Черноморско-Каспийского региона) // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–2 (23). 90. 21 с.
6. Crépin A.-S., Karcher M., Gascard J.-C. Arctic climate change, economy and society (ACCESS): Integrated perspectives // *Ambio*. 2017. Vol. 46, suppl. 3. P. S341–S354. doi:10.1007/s13280-017-0953-3
7. 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. doi:10.25283/2223-4594-2018-2-4-17
8. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н. Когнитивное моделирование влияния рыболовства на уровень жизни населения Беломорья // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и Океанология. 2019. № 9. С. 145–154. doi:10.17076/lim1120
9. Менишуткин В. В., Филатов Н. Н. Моделирование оптимального управления эколого-социо-экономической системой водоем – водосбор на примере Беломорья // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 3. С. 348–357. doi:10.31857/S0321059620030116
10. Менишуткин В. В., Минаева Т. П. Когнитивное моделирование как аппарат исследования эколого-экономических систем // Региональная экономика и развитие территорий : сборник научных статей. СПб. : ГУАП, 2018. Т. 1 (12). С. 157–163.
11. Менишуткин В. В., Минаева Т. П. Когнитивная модель взаимодействия человеческого общества с экологической системой водоема // Региональная экономика и развитие территорий : сборник научных статей. СПб. : ГУАП, 2017. Т. 1 (11). С. 160–167.
12. Ross D. *Economic Theory and Cognitive Science: Microexplanation*. London : MITPress, 2005. 454 p.
13. Павлов С. Н. Системы искусственного интеллекта. Томск : Эль Контент, 2011. Ч. 1. 174 с.
14. Kosko B. *Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic*. New York : Hyperion, 1993. 318 p.
15. Чернов И. А., Толстикова А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Математическое моделирование и информационные технологии. 2016. № 8. С. 116–128. doi:10.17076/mat397
16. Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора / Н. Н. Филатов [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 18–29.
17. Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Менишуткин В. В. Информационное обеспечение комплексных исследований природной среды и социо-экономических условий Белого моря и водосбора // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы Междунар. конф. М. : Издательство Московского университета, 2019. Т. 25, ч. 1. С. 122–137. <http://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137>
18. Walliser B. *Cognitive Economics*. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. 185 p. doi:10.1007/978-3-540-71347-0
19. Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Дружинин П. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море – водосбор» // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и Океанология. 2019. № 9. С. 30–50. doi:10.17076/lim1117
20. Гренандер У., Фрайбергер В. Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. М. : Наука, 1978. 192 с.

21. *Налимов В. В.* Вероятностная модель языка: о соотношении естественных и искусственных языков. М. : Наука, 1974. 272 с.
22. *Меншуткин В. В.* Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2010. 416 с.
23. *Курзнев В. А., Матвеев В. Д.* Экономический рост. СПб. : Питер, 2018. 608 с.
24. Когнитивная модель формирования показателя качества жизни / М. Б. Гузаиров [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17, № 2 (53). С. 215–220.
25. *Колмакова И. Д., Байкова Е. И., Колмакова Е. М.* Экономико-математические методы в оценке и планировании уровня жизни населения региона // Региональная экономика: теория и практика. 2017. Т. 15, № 5. С. 928–936. doi:10.24891/re.15.5.928
26. *Botkin D. B.* Forest Dynamics: An Ecological Model. New York : Oxford University Press, 1993. 309 p. doi:10.5860/choice.31-1511
27. *Kozak I., Menshutkin V. V., Klekowski R. Z.* Modelowanie elementów krajobrazu. Lublin : Towarzystwo Naukowe Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, 2003. 190 p.
28. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полуэктов [и др.]. СПб. : Изд. СПбГУ, 2006. 391 с.
29. *Баранов Н. С.* Стратегическое значение Севера для экономики России // Общество и право. 2014. № 3. С. 297–301.

Об авторах:

Меншуткин Владимир Васильевич, главный научный сотрудник, Институт проблем региональной экономики РАН (190013, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, д. 38), доктор биологических наук, профессор, menshutkina.n@gmail.com

Филатов Николай Николаевич, советник председателя ФИЦ Карельский научный центр РАН, главный научный сотрудник Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50), член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-3280-4375, SPIN-код: 5378-8040, nfilatov@rambler.ru