

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИАНГАРЬЯ

Столбов Александр Борисович

к.т.н., м.н.с., e-mail: stolboff@icc.ru,

Лемперт Анна Ананьева

к.ф.-м.н., в.н.с, e-mail: lempert@icc.ru,

Козлов Владимир Васильевич

программист, e-mail: boba50@mail.ru,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской Академии наук, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Аннотация. В статье рассматриваются результаты, касающиеся одной из актуальных задач исследования окружающей среды: сценарного моделирования состояния водных ресурсов. При этом для поддержки сценарного моделирования разрабатываются несколько взаимосвязанных онтологий: онтология компонентно-ориентированного моделирования сложных объектов, содержащую информацию о структуре моделей и принципах их построения и онтология водных объектов, использующая информацию из сторонних информационных моделей водных ресурсов, а также на основе анализа научно-методической литературы и открытых источников данных мониторинга водных объектов Иркутской области. Для апробации подхода в рамках поискового этапа исследований основной математической моделью в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений выбрана известная балансовая модель изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек.

Ключевые слова: математическое моделирование, сценарный анализ, онтологии, Байкальский регион, водные объекты

Цитирование: Столбов А.Б., Лемперт А.А., Козлов В.В. Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 3 (19). С. 14-24. DOI: 10.38028/ESI.2020.19.3.002.

Введение. В настоящее время исследованиями в области изучения водных объектов, в том числе связанных с анализом антропогенной нагрузки и оценкой качества воды, занимаются многие специалисты в России и за рубежом. Как следствие, накоплен богатый теоретический и практический опыт, разработано большое количество методических рекомендаций, осуществляется законодательное осмысление и внедрение полученных результатов для регламентации деятельности на водных объектах. Тем не менее, ряд объективных и субъективных проблем, связанных со сложностью самого объекта исследования, с организацией непрерывного и массового процесса наблюдения за ним и с

необходимостью согласованного учёта нормативов разного уровня, сохраняют высокий уровень востребованности этих исследований.

С методологической точки зрения актуальным является применение междисциплинарного подхода к изучению водного объекта: привлечение специалистов из смежных областей, применение разнородного математического аппарата, комбинированное использование данных мониторинга и экспертных оценок. Всё большую роль в последние годы играют информационно-коммуникационные технологии как в области сбора и обработки данных, так и при организации вычислений, поддержки процесса моделирования и прогнозирования.

В последнее десятилетие активно набирает популярность направление комплексного моделирования окружающей среды, в рамках которого исследования водных объектов занимают значимое место. Особенностью этого нового направления является целенаправленное объединение усилий многих исследовательских коллективов между собой, а также активное привлечение специалистов-практиков из регулирующих и надзорных органов для выработки адекватных комплексных методик, средств и стандартов на основе современных технологических достижений [12, 17].

Таким образом, в настоящее время наблюдается тенденция к комплексному рассмотрению проблем окружающей среды вообще, и анализу состояния водных объектов, в частности. При этом необходимо отметить, что при совместной разработке особое внимание уделяется не столько получению конечного результата в форме модели или её спецификации, сколько организации процесса её создания, что и является основной темой данной статьи: на примере изучения водных объектов рассматриваются проблемы организации интеллектуальной поддержки процесса комплексного компонентного сценарного моделирования.

Компонентно-ориентированный подход к моделированию. При создании современных систем моделирования, способных осуществлять поддержку междисциплинарного подхода для работы сообщества разработчиков и пользователей, можно выделить две основные парадигмы. В первой парадигме модель создается и поддерживается небольшой группой разработчиков. При этом код модели находится под контролем этой группы, что, с одной стороны, упрощает разработку и сопровождение кода, но, с другой стороны, ограничивает размер сообщества, способствующего развитию модели. Такой подход является традиционным и изначально направлен на целостное и комплексное изучение сложного объекта. Тем не менее в последние годы современные достижения в области коммуникационных и вычислительных возможностей создали предпосылки для активного развития другого направления – компонентно-ориентированного моделирования.

В рамках этой второй парадигмы небольшой группой разработчиков создается и поддерживается каркас (фреймворк) моделирования. При этом для внешнего сообщества существует возможность вносить свой вклад в развитие модельного аппарата, используемого в каркасе. Разработчики создают свои модели как компоненты и придерживаются установленных стандартов, которые необходимы для обеспечения совместимости моделей друг с другом. Такой компонентный подход к построению моделей на данный момент является менее устоявшимся, однако он приобретает всё большую популярность, так как способствует более активному продвижению и внедрению результатов моделирования в государственных структурах и промышленных предприятиях, особенно в области

исследований окружающей среды, где сама специфика решаемых задач требует коллективных усилий [17].

Главная особенность использования компонентов заключается в том, что каждая модель в системе является независимой, но может быть интегрирована с другими. Таким образом, компонентное моделирование является ключевым принципом в развитии современных каркасов моделирования и обеспечивает их гибкость и расширяемость. Децентрализации функциональности модели на независимые компоненты позволяет получить следующие преимущества по сравнению с традиционными подходами к созданию моделей:

- проводить моделирование относительно свободнее, так как можно отказаться от строгих допущений, характерных для централизованного подхода к построению моделей;
- специалистам можно сосредоточиться на вопросах реализации отдельных компонентов;
- пользователям (в т.ч. лицам, принимающим решения) легче понимать структуру целостных систем, построенных из более детальных компонентов.

Тем не менее существует и целый ряд областей, где компонентно-ориентированный подход в силу своей изначальной общности уступает моделям и системам, полученным на основе традиционного подхода. К таким проблемам относятся:

- эффективность вычислений (эффективность архитектуры, точность вычислений, поддержка специфических аппаратных требований при реализации);
- хранение данных (единые стандарты обработки и представления данных, распределенное хранение, взаимосвязь хранилищ и компонентов);
- наглядность представления, сложность изучения (документация, руководство, обучение, пользовательский интерфейс);
- средства поддержки модульности и связности.

Далее в работе более подробно рассматривается последняя проблема, так как её решение частично затрагивает и предыдущие вопросы.

Идея компонентного моделирования активно эксплуатируется в комплексном моделировании окружающей среды (Integrated Environmental Modeling – IEM). Для решения проблемы модульности и связности разработаны различные стандарты взаимодействия компонентов IEM. Наиболее популярными на данный момент являются следующие стандарты:

- OpenMI (Open Modeling Interface),
- OMS (Object Modeling System),
- Basic Model Interface (BMI) проекта CSDMS (Community Surface Dynamics Modeling System).

Эти стандарты содержат набор стандартных функций для выполнения запросов и управления, которые при добавлении в код модели и реализации облегчают ее интеграцию с другими элементами программного обеспечения.

Важной особенностью решения проблемы поддержки модульности и связности является то, что при сборке комплексной модели из моделей-компонентов необходимо не просто правильно смонтировать компоненты с технической точки зрения (например, на

основе передачи сообщений или приведенных выше примеров стандартов), но также требуются специальные научные знания о предметных и проблемных связях. При этом необходимо учитывать следующие факторы:

- семантическая неоднородность между дисциплинами, обусловленная разнообразием терминологии, используемой внутри моделей для описания: уравнений, переменных, параметров, единиц измерения;
- разнообразие понятий, используемых для определения функциональности и взаимосвязей между компонентами, что приводит к чрезмерной сложности получаемых модельных композиций;
- синтаксическая неоднородность в структуре метаданных, используемых для описания компонента в рамках моделирования, препятствует повторному использованию компонента;
- несоответствие элементов соединения, возникающее в результате несогласованных пространственных или временных обменов данными или из-за несовместимости семантики, используемой различными моделями.

В совокупности влияние перечисленных факторов приводит к отсутствию общего понимания и плохой коммуникации внутри и между пользователями систем компонентного моделирования, а для их учёта требуется разработка специализированных механизмов проектирования, построения, тестирования и обслуживания сложных систем моделирования. Одним из вариантов, способствующим решению описанных проблем, является использование онтологического подхода, который традиционно применяется в тех случаях, когда необходимо формально согласовать различного рода семантические и синтаксические несоответствия.

Концептуальная модель компонентно-ориентированного сценарного моделирования (КМ КОСМ). В настоящее время разработкой онтологий в разных областях науки об окружающей среде занимаются многие коллективы. В ходе анализа особое внимание уделялось онтологиям водных ресурсов, онтологиям математического и компонентного моделирования.

В качестве программного средства для ввода, редактирования и представления КМ КОСМ была использована, разрабатываемая при участии одного из авторов статьи, платформа построения систем, основанных на знаниях [19]. При этом при создании КМ КОСМ системный компонент для обработки концептуальных моделей дополнен модулем, расширяющим информацию о понятиях данными об источниках информации: описание библиографических ссылок; список альтернативных названий и определений понятия (в т.ч. на русском и английских языках); ссылки на онтологию-источник; ссылки на онтологии и другие электронные ресурсы, в которых были использованы понятия; перечень примеров для элемента КМ в форме текста.

За основу при создании КМ КОСМ была выбрана онтология компонентов водных ресурсов (Water Resources Component – WRC) [14], в которой, свою очередь, использована информация из следующих проектов: The Earth System Curator (ESC) [13] – содержит метаданные, описывающих программное обеспечение численного моделирования климата; Community Surface Dynamics Modeling System (CSDMS) [21] – проект по созданию среды

моделирования на основе программных модулей с открытым исходным кодом для исследования широкого спектра процессов, связанных с земной поверхностью.

Для КМ КОСМ на основе WRC были предложены 7 уровней: ресурсный, технический, связующий, математический, единиц измерения, предметный, сценарный.

Ресурсный уровень предназначен для описания информации о разработчиках компонента, типах используемых файлов, уровне готовности компонента. Для создания этого уровня использовались информационные модели из [12, 16]. Имеет аналог в онтологии WRC.

Технический уровень предназначен для описания информации о требуемой компьютерной архитектуре, которая позволяет запускать вычислительный эксперимент, реализуемый с использованием компонентов; редактировать или обновлять код компонентов; определять вычислительные ресурсы, необходимые для выполнения задач компонента; оптимизировать процесс выполнения моделирования при наличии доступных вычислительных ресурсов (например, по временному фактору). Основные понятия технического уровня: операционная система, язык программирования, объём памяти, количество процессоров, тип параллелизмами. Имеет аналог в WRC.

Связующий уровень содержит понятия, свойства и отношения, традиционно используемые каркасами моделирования для решения следующих задач: определение стандартов соединения компонентов; определение поддерживаемых каркасов моделирования; определение вычислительных характеристик компонента (например, виды пространственных и временных характеристик). Имеет аналог в WRC. Также используются информационные модели проектов Community Surface Dynamics Modeling System (CSDMS) и Open Modeling Interface [15].

Математический уровень предназначен для описания уравнений компонентов, входных и выходных переменных, параметров, математической классификации уравнений и численных методов. Для разработки этого уровня, помимо онтологии WRC, были также использованы: The Mathematical Modelling Ontology [22] и OntoMathPRO [18].

В качестве отправной точки для апробации подхода будет использоваться комплексная модель для расчета изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек [8]. Модель позволяет рассчитывать изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек и определять интервалы времени, в течение которых значения этих характеристик не выходят за пределы, обусловленные экологическими требованиями. Модель относится к балансовому типу и включает два взаимосвязанных блока – гидрологический и качества воды. Основными переменными и параметрами модели являются:

- объём, площадь водного объекта, уровень воды;
- расходы воды главной реки, притоков, сбросов сточных вод, водозабор, испарения, осадки, расход в смежный водоём (море);
- значения слоя осадков и испарений;
- масса вещества в водном объекте;
- поступление вещества вследствие его преобразования из других веществ или продукции при биохимических процессах;
- расходование вещества вследствие его разложения или потребления организмами;
- убыль вещества на одной из внешних границ водного.

Уровень единиц измерения основан на известных онтологиях Semantic Web for Earth and Environment Technology (SWEET) [20] и Units of Measurement Ontology [23]. Суммарно эти онтологии содержат более 6000 понятий. На текущем этапе реализации проекта в КМ КОСМ добавлены только имеющие отношение к водным ресурсам единицы измерения и связанные с ними понятия верхнего уровня. Не имеет аналога в WRC.

Сценарный уровень является наиболее оригинальным и должен, в том числе, содержать описание особенностей интеллектуального и математического моделирования уникальных сложных объектов. На данный момент этот уровень находится в стадии активной разработки; рассматриваются следующие типы сценариев: изменение значений входных переменных и изменение значений параметров.

Предметный уровень фактически представляет собой онтологию водных ресурсов. Для её создания источниками исходной информации по водному объекту, его водосбору, видам воздействия и связанной с ними хозяйственной и иной деятельности являются:

- данные справочной литературы;
- официальные источники информации (реестры и кадастры, фонды и банки данных и т.п.);
- публикации в монографиях, журналах и на веб-ресурсах, содержащие результаты ранее проведенных изыскательских и научно-исследовательских работ по изучению водосборной территории и водных ресурсов, включая данные мониторинга;
- информационные модели (онтологии), посвященные водным ресурсам.

Для создания множества понятий и отношений первого варианта предметного уровня КМ КОСМ за основу были взяты классические монографии и современные учебники по оценке качества природных вод [2, 3, 5-7, 11], а также характеристики используемой балансовой гидро-экологической модели [8]. Пример пользовательского интерфейса для редактирования понятий КМ КОСМ представлен на рисунке 1.

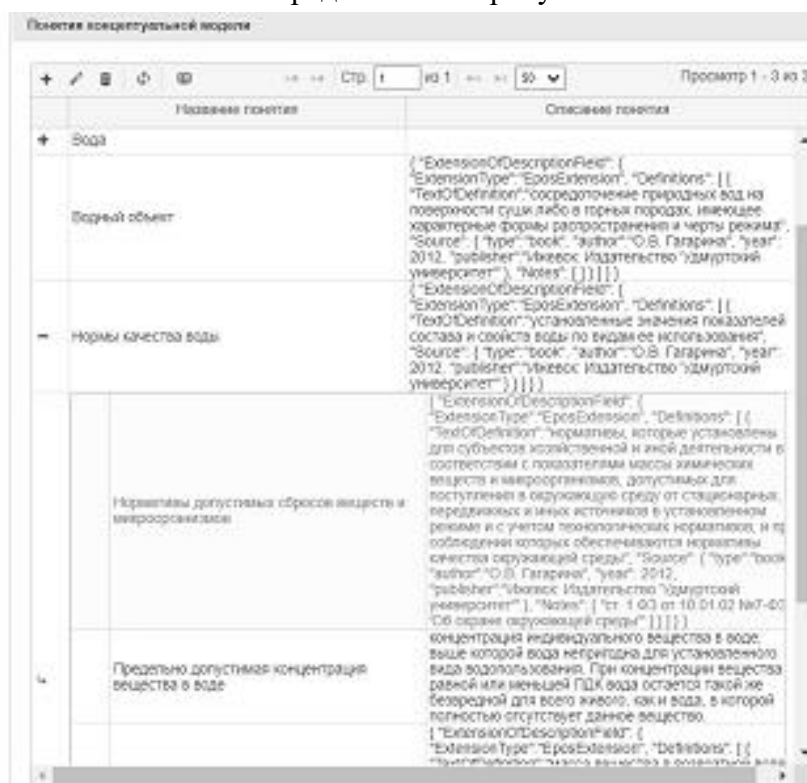


Рис. 1. Фрагмент предметного уровня КМ КОСМ в пользовательском редакторе

Среди прочих источников информации выделяется ЕСИМО [9] – межведомственная информационная система для доступа к ресурсам морских информационных систем и комплексного информационного обеспечения морской деятельности. Эта система предоставляет открытый доступ к большому количеству информации по гидрологии рек (характерные уровни воды, ежедневные расходы воды), оперативных данных метеонаблюдений и обобщенных метеорологических параметров для регионов России (в основном для Дальнего Востока).

Заключение. На основе анализа современного состояния и проблем в области поддержки сценарного моделирования сложных объектов окружающей среды на примере водных объектов выявлены два основных подхода, к которым можно свести существующие решения: традиционный (целостный) и компонентно-ориентированный. Последний подход выбран за основу для интеграции математических моделей и программных модулей, используемых в процессе поддержки сценарного моделирования. Для преодоления имеющихся проблем, возникающих в ходе применения компонентно-ориентированного подхода и связанных, прежде всего, с различными типами несогласованностей в процессе интеграции компонентов, предлагается использование онтологий. Информация из существующих онтологий, связанных с тематикой исследований, использована для разработки прототипа концептуальной модели компонентно-ориентированного сценарного моделирования, включающая следующие 7 уровней: ресурсный, технический, связующий, математический, единиц измерения, предметный, сценарный.

С использованием предложенной концептуальной модели на первом этапе процесса сценарного моделирования водных объектов будут описаны вычислительные компоненты системы. На последующих этапах на основе этой информации с использованием базы знаний будут осуществляться содержательная интеграция компонентов и формирование технического задания в соответствии с требованиями используемого каркаса моделирования.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-380001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульон В.В. Фосфорный бюджет озера Байкал и водохранилищ Ангарского каскада: моделирование, реконструкция и прогноз // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 2. С. 244–246.
2. Владимиров А.М., Орлов В.Г. Охрана и мониторинг поверхностных вод суши. Учебник. СПб.: РГГМУ. 2009. 220 с.
3. Гагарина О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы: Учебно-методическое пособие. Ижевск: Издательство «Удмуртский университет». 2012. 199 с.
4. Информация о состоянии загрязнения окружающей среды на территории деятельности «Иркутского УГМС». Режим доступа: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=5> (дата обращения 18.09.2020).
5. Караушев А.В. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Ленинград: Гидрометеиздат. 1987. 285 с.
6. Караушев А.В. Речная гидравлика. Курс общей и специальной гидравлики для гидрологов. Ленинград: Гидрометеиздат. 1969. 416 с.

7. Клейн М.В. Некоторые проблемы методического и метрологического обеспечения контроля качества водных ресурсов // *Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследования: труды. Казань: Изд-во. Казан. гос. ун-т. 2009. Т. 4. С. 121-124.*
8. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ. 1998. 176 с.
9. Портал Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Режим доступа: <http://portal.esimo.ru/> (дата обращения 18.09.2020).
10. Уровень воды онлайн – Allrivers. Данные с гидропостов в Восточной Сибири. Режим доступа: <https://allrivers.info/region/russia/siberia> (дата обращения 18.09.2020).
11. Филатов Н.Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т.12. №1. С. 3-14.*
12. Argent R. An overview of model integration for environmental applications – Components, frameworks and semantics // *Environmental Modelling & Software. 2004. Vol. 19. № 3. Pp. 219-234.*
13. Dunlap R., Mark L., Rugaber S., Balaji V., Chastang J., Cinquini L., DeLuca C., Middleton D., Murphy S. Earth system curator: Metadata infrastructure for climate modeling // *Earth Science Informatics. 2008. № 1. Pp. 131-149.*
14. Elag M., Goodall J.L. An ontology for component-based models of water resource systems // *Water Resour. Res. 2013. № 49. Pp. 5077-5091.*
15. Harpham Q., Hughes A., Moore R.V. Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models // *Environmental Modelling & Software. 2019. Vol. 122. 104549. Pp. 1-13.*
16. Horsburgh J., Tarboton D., Maidment D., Zaslavsky I. A relational model for environmental and water resources data // *Water Resources Research. 2008. Vol. 44. № 5. W05406. Pp. 1-12.*
17. Moore R., Hughes A. Integrated environmental modelling: Achieving the vision // *Geological Society, London, Special Publications. 2016. Vol. 408. Pp. 17-34.*
18. Nevzorova O.A, Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // *Communications in Computer and Information Science. 2014. Vol. 468. Pp. 105-119.*
19. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The software platform architecture for the component-oriented development of knowledge-based systems // *Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018. Pp. 1234-1239.*
20. Raskin R., Pan M. Knowledge representation in the Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET) // *Computers & Geosciences. 2005. Vol. 31. № 9. Pp. 1119-1125.*
21. Syvitski J., Hutton E., Peckham S., Slingerland R. CSDMS - A modeling system to aid sedimentary research // *Sedimentary Geology. 2011. Vol. 9. № 1. Pp. 4-9.*
22. The Mathematical Modelling Ontology. Режим доступа: <https://sourceforge.net/p/mamo-ontology/wiki/Home> (дата обращения 18.09.2020).
23. Units of Measurement Ontology. Режим доступа: <https://github.com/bio-ontology-research-group/unit-ontology> (дата обращения 18.09.2020).

THE ONTOLOGICAL APPROACH APPLICATION FOR INTELLECTUAL SUPPORT OF SCENARIO MODELING OF WATER OBJECTS IN THE ANGARA REGION

Anna A. Lempert

Ph. D., leading researcher, e-mail: lempert@icc.ru,

Alexander B. Stolbov

Ph. D., junior researcher, e-mail: stolboff@icc.ru,

Vladimir V. Kozlov

software developer, e-mail: boba50@mail.ru,

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia.

Annotation. The article discusses the results related to one of the specific tasks of environmental research: scenario modeling of the water resources state. To support scenario modeling, several interrelated ontologies are being developed: an ontology of component-oriented scenario modeling of complex objects containing information about the structure of models and the principles of their construction and an ontology of water objects that utilizes data and knowledge from third-party information models of water resources, as well as based on the analysis of scientific and methodological literature and open sources of monitoring data for water objects of the Irkutsk region. For the approach testing a well-known mathematical model balance model of changes in the hydrological and ecological characteristics of river mouths was chosen.

Keywords: mathematical modeling, scenario analysis, ontologies, Baikal region, water objects

References

1. Bul'on V.V. Fosfornyj byudzheth ozera Bajkal i vodohranilishch Angarskogo kaskada: modelirovanie, rekonstrukciya i prognoz [Phosphorus budget of lake Baikal and reservoirs of the Angara cascade: modeling, reconstruction and forecast] // Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 480. № 2. Pp. 244-246. (in Russian).
2. Vladimirov A.M., Orlov V.G. Ohrana i monitoring poverhnostnyh vod sushi. Uchebnik [Protection and monitoring of land surface waters. Textbook]. SPb.: RGGMU, 2009. 220 p. (in Russian).
3. Gagarina O.V. Ocenka i normirovanie kachestva prirodnyh vod: kriterii, metody, su-shchestvuyushchie problemy: Uchebno-metodicheskoe posobie [Assessment and regulation of natural water quality: criteria, methods, existing problems: Training manual]. Izhevsk: Izdatel'stvo «Udmurtskij universitet». 2012. 199 p. (in Russian).
4. Informaciya o sostoyanii zagryazneniya okruzhayushchej sredy na territorii deyatel'nosti «Irkutskogo UGMS» [Information about the state of environmental pollution in the territory of

- Irkutsk Region]. Available at: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=5> (accessed 18.09.2020). (in Russian).
5. Karashev A.V. Metodicheskie osnovy ocenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverhnostnyh vod [Methodological bases of assessment and regulation of anthropogenic impact on surface water quality.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 285 p. (in Russian).
 6. Karashev A.V. Rechnaya gidravlika. Kurs obshchej i special'noj gidravliki dlya gidrologov [River hydraulics. General and special hydraulics course for hydrologists]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 416 p. (in Russian).
 7. Klejn M.V. Nekotorye problemy metodicheskogo i metrologicheskogo obespecheniya kontrolya kachestva vodnyh resursov [Some problems of methodological and metrological support of water quality control]// Okruzhayushchaya sreda i ustojchivoe razvitie regionov: novye metody i tekhnologii issledovaniya: Trudy = Environment and sustainable development of regions: new research methods and technologies: proceedings. Kazan': Izd-vo. Kazan. gos. unt., 2009. Vol. 4. Pp. 121-124. (in Russian).
 8. Mihajlov V.N. Gidrologiya ust'ev rek [Hydrology of river mouths]. M.: Izd-vo MGU, 1998. 176 p. (in Russian).
 9. Portal Edinoj gosudarstvennoj sistemy informacii ob obstanovke v Mirovom okeane (ESIMO) [Portal of the Unified state information system on the situation in the world ocean]. Available at: <http://portal.esimo.ru/> (accessed 18.09.2020). (in Russian).
 10. Uroven' vody onlajn – Allrivers. Dannye s gidropostov v Vostochnoj Sibiri [The water level of online Allrivers. Data from hydro stations in Eastern Siberia]. Available at: <https://allrivers.info/region/russia/siberia> (accessed 18.09.2020). (in Russian).
 11. Filatov N.N. Sostoyanie i perspektivy issledovanij gidrofizicheskikh processov i ekosistem vnutrennih vodoemov [The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review)] // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and applied hydrophysics. 2019. Vol. 12, № 1. Pp. 3-14. (in Russian).
 12. Argent R. An overview of model integration for environmental applications – Components, frameworks and semantics // Environmental Modelling & Software. 2004. Vol. 19. № 3. Pp. 219-234.
 13. Dunlap R., Mark L., Rugaber S., Balaji V., Chastang J., Cinquini L., DeLuca C., Middleton D., Murphy S. Earth system curator: Metadata infrastructure for climate modeling // Earth Science Informatics. 2008. № 1. Pp. 131-149.
 14. Elag M., Goodall J.L. An ontology for component-based models of water resource systems // Water Resour. Res. 2013. No49. Pp. 5077–5091.
 15. Harpham Q., Hughes A., Moore R.V. Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models // Environmental Modelling & Software. 2019. Vol. 122. 104549. Pp. 1-13.
 16. Horsburgh J., Tarboton D., Maidment D., Zaslavsky I. A relational model for environmental and water resources data // Water Resources Research. 2008. Vol. 44. № 5. W05406. Pp. 1-12.
 17. Moore R., Hughes A. Integrated environmental modelling: Achieving the vision // Geological Society, London, Special Publications. 2016. Vol. 408. Pp. 17-34.

18. Nevzorova O.A, Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // Communications in Computer and Information Science. 2014. Vol. 468. Pp. 105-119.
19. Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Stolbov A.B. The software platform architecture for the component-oriented development of knowledge-based systems // Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018. Pp. 1234-1239.
20. Raskin R., Pan M. Knowledge representation in the Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET) // Computers & Geosciences. 2005. Vol. 31. № 9. Pp. 1119-1125.
21. Syvitski J., Hutton E., Peckham S., Slingerland R. CSDMS - A modeling system to aid sedimentary research // Sedimentary Geology. 2011. Vol. 9. № 1. Pp. 4-9.
22. The Mathematical Modelling Ontology. Available at: <https://sourceforge.net/p/mamontology/wiki/Home> (accessed 18.09.2020).
23. Units of Measurement Ontology. Available at: <https://github.com/bio-ontology-research-group/unit-ontology> (accessed 18.09.2020).