

Обработка и усвоение данных космического зондирования для осуществления мониторинга текущего состояния разнородных объектов на поверхности водоемов

Н.Д. Панасенко, А.М. Атаян, Н.С. Мотуз

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Работа посвящена анализу методов усвоения данных спутниковых наблюдений для выявления необходимой информации, применяемой при разработке и верификации математических моделей гидродинамики и биологической кинетики мелководных водоемов. Рассматривается возможность использования нейронных сетей с вычислением оптического потока. Для накопления информации рассматриваем использование данных дистанционного зондирования. Целью работы является создание программного инструментария, применяемого для получения начальных условий при математическом моделировании гидробиологических процессов мелководного водоема.

Ключевые слова: математическое моделирование, мелководный водоем, данные спутникового зондирования, нейронная сеть, контур, обработка изображений.

В последнее десятилетие увеличивается частота появления неблагоприятных и катастрофических явлений в прибрежных системах Юга России. К их числу можно отнести катастрофический шторм в ноябре 2006 г.; штормовые нагоны в 2007, 2014 гг., приведшие к человеческим жертвам и материальным потерям; обмеление Азовского моря у берегов Таганрога (Ростовская область) и реки Дон в ноябре 2019, связанное с малым количеством осадков в бассейнах рек, впадающих в Азовское море, и сильным ветром, отгоняющим воду от побережья; замор рыбы в июле 2020 г. в юго-восточном секторе Азовского моря, нанесший значительный ущерб процессу воспроизводства промысловых рыб. И это неполный список тех явлений и процессов, которые необходимо прогнозировать на основе взаимосвязанных моделей гидрофизики и биологической кинетики [1].

Математическим моделированием процессов гидродинамики и биологической кинетики проблем водных экосистем занимается огромное количество российских и зарубежных ученых. Существует множество экологических моделей разного назначения и уровня сложности. Огромный

вклад внесли фундаментальные работы в области создания математических моделей, разработки методов диагностики и прогнозирования изменений водных экосистем такие авторы, как Лотка А.Д. [2], Вольтерра В. [3], Марчук Г.И. [4], Р.В. Озмидов [5], Гаузе Г.Ф. [6], где рассматривались вопросы межвидового взаимодействия. Хатчинсон Д. Э. изучал флору и фауну озер. Митчерлих Э.А. открыл закон действия факторов роста и представил новый взгляд на науку о растениях [7]. Винберг Г.Г. [8] занимался исследованиями, связанными с процессами питания и роста водных организмов. Ворович И.И., и Горстко А.Б. [9] разработали схемы рационального использования водных ресурсов. Одум Г.Т. объяснил экологические структуры энергетическими системами [10]. Абакумов А.И. [11], Бобылева Т.Н. [12], Шушкевич Т.В. [13] активно занимаются разработкой методов оптимизации моделирования водных экосистем. Йёргенсен С.Э., Майер Ю. [14] изучают вопросы лимнологии и экологического моделирования. Фолленвайдер Р.А. исследовал эвтрофикацию озер. Бердников С.В. [15], Ильичев В.Г. [16] и Исаева, Л.С. [17] рассматривают математическое моделирование распространения загрязняющих веществ в прибрежных системах. И не смотря на свое разнообразие модели направлены на достижение одной главной цели - адекватное описание функционирования водных экосистем.

В настоящее время весьма остро стоит проблема оснащения реальными входными данными этих систем с целью их анализа и прогноза, что позволит корректно ставить начально-краевые задачи для систем нелинейных уравнений с частными производными, а также определять коэффициенты уравнений и других функциональных зависимостей, входящих в построенные модели. В связи с исследованиями глобальных изменений на планете Земля, научно-технологический прогресс приносит новые методы исследования океана (исследования Марчук Г.И. [18-20], Шутяев В.П. [19, 21, 22, 23, 25], Пармузин Е.И. [22, 23, 25] и Агошков В.И. [20, 23, 24, 25]).



Возрастает интерес к задачам усвоения и обработки данных наблюдений с использованием высокоточных дистанционных измерений с искусственных спутников Земли (ИСЗ), позволяющих осуществлять мониторинг текущего состояния Мирового океана.

Данные дистанционного зондирования позволяют не только оснащать математические модели необходимой информацией (граничными, начальными условиями, информацией о функциях-источниках), но и усваивать построенными моделями получаемые данные зондирования с целью повышения точности и увеличения надежности прогностического моделирования. Важнейшей задачей, которую необходимо решить, является разработка методов и инструментов для использования разнородных спутниковых данных. В связи с этим целью данной работы является описание процесса усвоения и обработка данных наблюдений с ИСЗ для осуществления мониторинга текущего состояния разнородных объектов на поверхности водоемов, в частности процессов «цветения» фитопланктонных водорослей.

В последнее десятилетие важное значение приобрели спутниковые методы исследования состояния окружающей среды и землепользования, изучение растительных сообществ, оценка урожая сельскохозяйственных культур, оценка последствий стихийных бедствий. На сегодняшний день запущено огромное количество спутников (Ресурс-П, WorldView, Landsat, KompSat, SPOT, Канопус-В, GeoEye, Radarsat, Сентинел-2 L2A, Ресурс-Ф и многие другие), как российских, так и зарубежных, которые покрывают большую часть планеты. Однако, большую проблему представляет получение «безоблачных» снимков и снимков различного масштаба. В процессе работы, осуществляя мониторинг текущего состояния поверхности водоемов, в частности процессов «цветения» фитопланктонных водорослей, вспомним.

Фитопланктон - основа трофической пирамиды биогеоценоза мелководного водоема, главное звено пищевой цепи «фитопланктон-зоопланктон-рыба». С течением рек в водоемы поступают питательные вещества - соединения азота, кремния и фосфора, вызывающие резкий рост популяции фитопланктона, называемый «цветением» [26].

Проблема интенсивного «цветения» воды очень остро стоит для самых разных акваторий. «Цветением» воды считают массовое развитие одного или 2-3 планктонных видов, сопровождающееся значительным ухудшением качества воды. Интенсивное и зачастую вредоносное цветение водорослей резко возросло в последние 20-30 лет и охватило как пресные, так и морские водоемы. Как считают гидробиологи, это вызвано целым комплексом факторов, таких как изменение климата, поступление в воду большого количества различных минеральных и органических веществ, связанное с интенсификацией хозяйственной деятельности человека [27].

В водоемах, подобных Азовскому морю и другим прибрежным системам Юга России, особую роль играют вихревые течения различных пространственных масштабов. Анализируя результаты экспедиционных измерений параметров водной среды в акватории Азовского моря, описанных в [1], и информацию со спутников, на изображениях видимого диапазона, можно сделать выводы, что в его Центрально-Восточной части существует область, в которой происходят заморные явления, причем появление этой области носит сезонный характер. Эти области интенсивного «цветения» и вихревые структуры течений выглядят на снимках с ИСЗ достаточно наглядно. Масштабные проявления циклонического вихря - яркий пример того, как биогенные загрязнители, вызванные интенсивным цветением цианобактерий, распространяются под влиянием динамических и циркулирующих процессов. На рис. 1 представим цветосинтезированные

изображения со спутников WorldView [28] и Ресурс-П [29], полученные 10 сентября 2019 г. над акваторией Азовского моря.



Рис. 1. – Распространение примесей:

а) спутник WorldView; б) спутник Ресурс-П

Рассмотрим математическую модель эволюции фитопланктона. На рис. 2 представлена схема водного объекта в виде замкнутого бассейна, ограниченного: σ боковой поверхностью водоема; Σ_0 поверхностью моря; $\Sigma_H = \Sigma_H(x, y)$ нижней поверхностью. $\Sigma = \Sigma_0 \cup \Sigma_H \cup \sigma$, Σ - граница области G , кусочно гладкая для всех $t \in (0, T_0]$ [26, 30].

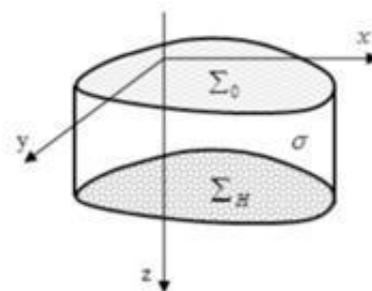


Рис. 2. – Схема водоема

В данной задаче необходимо учитывать большое количество параметров, часть из которых можно получить с использованием высокоточных дистанционных измерений с ИСЗ. Эти важные параметры включают исходное распределение фитопланктона, температуру воды и так далее.

Искусственные нейронные сети на сегодняшний день считаются достаточно прорывной технологией, хотя на уровне алгоритмов они были описаны еще во второй половине прошлого века. Но человечество только в настоящее время накопило достаточное количество информации и создало технические возможности для реализации их в конечный продукт.

Нейронные сети можно использовать для множества задач, включая анализ данных, оптимизацию и сжатие, аппроксимацию, прогнозирование, кластеризацию, принятие решений и обнаружение. Каждое из этих направлений может быть использовано при решении модельных задач гидродинамики и биологической кинетики, но в основном нейронные сети используются для обнаружения - распознавания и классификации изображений [26].

Наша задача состоит в обучении нейронной сети возможности определять между соседними изображениями (близкими по времени съемки), как передвигались те или иные объекты, которые могут быть пятнами планктонных популяций, поверхностными пленками, включая пленки нефтепродуктов и др. Для этого необходима разработка программного обеспечения с возможностью вычисления оптического потока между двумя изображениями с применением обучения нейросети с учителем.

Составляя входную информацию для обработки, соберем определенную коллекцию изображений. Для наглядного примера возьмем съемку цветосинтезированного изображения со спутников WorldView [28] и Сентинел-2 L2A [31], полученные в промежутке с 05.10.2020 г. по 20.10.2020 г. над акваторией Азовского моря в разное время суток (рисунок 3). Из имеющихся снимков соберем обучающую выборку и постараемся обучить сеть нахождению и распознаванию имеющихся на поверхности водоема объектов (рисунок 4).



Рис. 3. – Съемка изображений с расширением 50 км со спутника WorldView и 10 км со спутника Сентинел-2 L2A

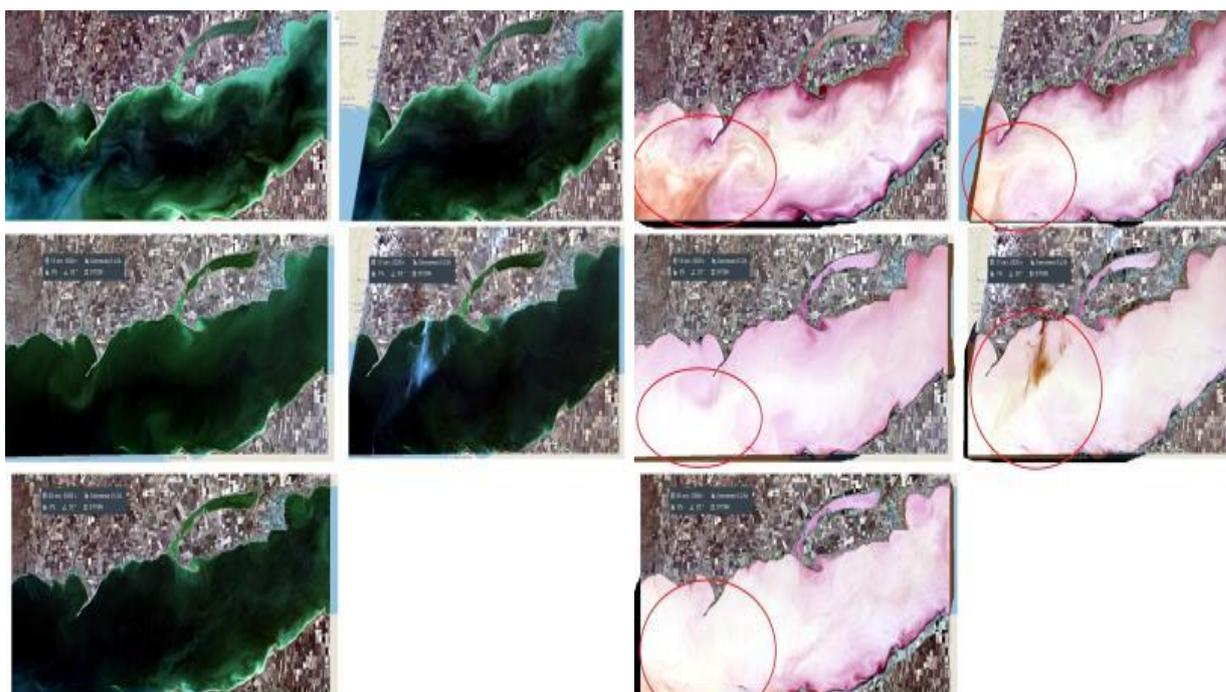


Рис. 4. – Обучающая выборка

Основная идея использования этих технологий - повысить точность прогнозного моделирования. Для успешной реализации нам необходима достаточно обширная коллекция изображений. Реализация программного обеспечения осуществляется на языке Python, с обращением к различным

источникам, таким как [32]. В результате мы сможем определять и классифицировать поля распределения фитопланктона и загрязняющих веществ.

В статье показана актуальность использования обработки данных наблюдений с искусственных спутников Земли. Рассмотрена необходимость применения нейросетевого подхода с вычислением оптического потока при решении задач получения информации с полутонных изображений. При дальнейших исследованиях будем опираться на полученные результаты. Планируется доработка программного обеспечения для компьютерной реализации обработки. Уделим больше времени рассмотрению математической стороны данного вопроса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-90070 «Математические модели и численные методы для анализа и прогноза состояния прибрежных систем на основе данных дистанционного зондирования» и проект № 20-31-90105 «Параметризация моделей вертикального турбулентного обмена в 3D гидрофизических моделях прибрежных систем на основе усовершенствованных алгоритмов и программ обработки натуральных данных».

Литература

1. Сухинов А.И., Атаян А.М., Белова Ю.В., Литвинов В.Н., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Обработка данных натуральных измерений экспедиционных исследований для математического моделирования гидродинамических процессов Азовского моря // Вычислительная механика сплошных сред, 2020. Т. 13. № 2. С. 161-174.
2. Lotka A.J. Contribution to the energetics of evolution // Proc. Natl. Acad. Sci. 1922. №. 8. pp. 147-150. DOI:10.1073/pnas.8.6.147

3. Volterra V. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together // Rapp. P. – V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. 1928. Vol. 3. pp. 3-51. DOI:10.1093/icesjms/3.1.3
 4. Марчук Г.И., Саркисян А.С. Математическое моделирование циркуляции океана. // Москва: Наука, 1988. С. 304.
 5. Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане. – Л. Гидрометеиздат, 1986. С. 278
 6. Gause G.F. Experimental studies on the struggle for existence: 1. Mixed population of two species of yeast // Journal of Experimental Biology. 1932. V. 9. pp. 389-402.
 7. Mitscherlich E.A. Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrags // Landw. Jahrb. 1909. 595 p.
 8. Винберг Г.Г. Некоторые итоги практики применения продукционно-гидробиологических методов. // Продукция популяций и сообществ водных организмов и методы ее изучения. – Свердловск: Урал. центр АН СССР, 1985, С. 3-18.
 9. Ворович И.И., Горелов А.С., Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Сурков В.Ю., Эпштейн Л.В. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря: математические модели / под ред. И. И. Воровича. - Москва: Наука, 1981. С. 360.
 10. Odum H.T. System Ecology. New York: Wiley, 1983. 644 p.
 11. Абакумов А.И. Признаки стабильности водных экосистем в математических моделях // Труды Института системного анализа РАН. Системный анализ проблемы устойчивого развития. М.: ИСА РАН. 2010, Т. 54, С. 49 – 60.
 12. Бобылева Т.Н. Моделирование очистки сточных вод на вертикальных фильтрах // Инженерный вестник Дона, 2020, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6643
-



13. Шушкевич Т.В. Использование метамоделли в качестве основы для описания пространственных данных // Инженерный вестник Дона, 2020, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6660
 14. Jorgensen S.E., Mejer H., Firiis M. Examination of a lake model // Ecological Modelling. 1978. Vol. 4. pp. 253-278.
 15. Бердников, С.В. Имитационная модель основных компонентов экосистемы Охотского моря // Морской гидрофизический журнал. 1989. Т.3. С. 52–58.
 16. Ильичев, В.Г. Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах // М: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2008. 231 с.
 17. Исаева, Л.С., Исаев И.Л. Горизонтальная турбулентная диффузия в море // Труды МГИ. Физика моря. – К.: Изд-во АН УССР, 1963. Т. 28. С. 36–39.
 18. Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б. Информационно-вычислительные технологии – новый этап развития оперативной океанографии // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2013. Т. 49. № 6. С. 629.
 19. Марчук Г.И., Шутяев В.П. Сопряженные уравнения и итерационные алгоритмы в задачах вариационного усвоения данных // Труды института математики и механики УрО РАН, 2011. Т. 17. № 2. С. 136-150.
 20. Марчук Г.И., Агошков В.И., Ипатова В.М. Теория разрешимости начально-краевых задач и задач ассимиляции данных для основных уравнений океана // Труды Московского физико-технического института, 2011. Т. 3. № 1 (9). С. 93-101.
 21. Шутяев В.П. Методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2019. Т. 55. № 1. С. 17-34.
-

22. Шутяев В.П., Пармузин Е.И. Исследование чувствительности оптимального решения задачи вариационного усвоения данных для модели термодинамики Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 71-80.

23. Пармузин Е.И., Агошков В.И., Захарова Н.Б., Шутяев В.П. Вариационная ассимиляция данных спутниковых наблюдений в модели гидротермодинамики моря // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018. Электронный сборник статей 16-й конференции. Институт космических исследований Российской академии наук, 2018. С. 1-8.

24. Агошков В.И., Залесный В.Б., Шелопут Т.О. Вариационная ассимиляция данных в задачах моделирования гидрофизических полей в открытых акваториях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2020. Т. 56. № 3. С. 293-308.

25. Шутяев В.П., Ле Диме Ф., Агошков В.И., Пармузин Е.И. Чувствительность функционалов задач вариационного усвоения данных наблюдений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 392.

26. Leontyev A.L., Nikitina A.V., Chumak M.I. Application of assimilation and filtration methods for satellite water sensing data for plankton population evolution processes predictive modeling // Computational Mathematics and Information Technologies. Electronic journal. 2020. Т. 1. № 1. pp. 1-11.

27. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчкова А.Я., Шендрик В.Д. Спутниковый мониторинг цветения вредоносных водорослей на Рыбинском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, Т. 11. №. 3. 54-72 с.

28. The official website of NASA Worldview, worldview.earthdata.nasa.gov.

29. The official website of Roscosmos Geoportal, gptl.ru.

30. Nikitina A.V., Sukhinov A.I., Peskova O.Yu. Mathematical modeling of pollution propagation processes and phytoplankton evolution in relation to the Taganrog Bay area // Izvestia TRTU. 2001. №. 2 (20). pp. 32-35.

31. The official website of Earth observing system.
eos.com/landviewer/account/pricing

32. Ростовцев В.С. Искусственные нейронные сети // Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 216 с.

References

1. Sukhinov A.I., Atayan A.M., Belova Yu.V., Litvinov V.N., Nikitina A.V., Chistyakov A.E. Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred, 2020. V. 13. №. 2. pp. 161-174.

2. Lotka A.J. Proc. Natl. Acad. Sci. 1922. №. 8. pp. 147-150.
DOI:10.1073/pnas.8.6.147

3. Volterra V. Rapp. P. V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. 1928. Vol. 3. pp. 3-51. DOI:10.1093/icesjms/3.1.3

4. Marchuk G.I., Sarkisyan A.S. Matematicheskoe modelirovanie cirkulyacii okeana [Mathematical modeling of ocean circulation]ю Moskva: Nauka, 1988. 304 p.

5. Ozmidov R. V. Diffuziya primesej v okeane [Diffusion of impurities in the ocean]. L. Hydrometeoizdat, 1986. 278 p.

6. Gause G.F. Journal of Experimental Biology, 1932. V. 9. pp. 389-402.

7. Mitscherlich E.A. Landw. Jahrb. 1909. 595 p.

8. Vinberg G.G. Produkciya populyacij i soobshchestv vodnyh organizmov i metody ee izucheniya. Sverdlovsk: Ural. centr, 1985, pp. 3-18.

9. Vorovich I.I., Gorelov A.S., Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Surkov F.A., Epstein L.V. Racional`noe ispol`zovanie vodny`x resursov bassejna Azovskogo morya: matematicheskie modeli [Rational use of

water resources of the Azov sea basin: mathematical models]. Izd. I.I. Vorovich. Moskva: Nauka, 1981. 360 p.

10. Odum H.T. System Ecology. New York: Wiley, 1983. 644 p.
 11. Abakumov A.I. Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN. Sistemnyj analiz problemy ustojchivogo razvitiya. Moskva: ISA RAS, 2010, Vol. 54, pp. 49-60.
 12. Bobyleva T.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6643
 13. Shushkevich T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6660
 14. Jorgensen S.E., Mejer H., Firiis M. Ecological Modelling. 1978. Vol. 4. pp. 253-278.
 15. Berdnikov, S.V. Morskoj gidrofizicheskij zhurnal. 1989. T.3. pp. 52–58.
 16. Ilyichev, V.G. Ustojchivost`, adaptaciya i upravlenie v e`kologicheskix sistemax [Sustainability, adaptation and management in ecological systems]. M: Izdatel'stvo FIZMATLIT, 2008. 231 p.
 17. Isaeva, L.S. Trudy MGI. Fizika morya. K.: Izd-vo AN USSR., 1963. T. 28. pp. 36–39.
 18. Marchuk G.I., Paton B.E., Korotaev G.K., Zalesny V.B. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana, 2013. T. 49. № 6. pp. 579-591.
 19. Marchuk G.I., Shutyaev V.P. Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta, 2011. V. 17. №. 2. pp. 136-150.
 20. Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Ipatova V.M. Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta, 2011. V. 3. №. 1 (9). pp. 93-101.
 21. Shutyaev V.P. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana 2019. T. 55. № 1. pp. 17-31.
-



22. Shutyaev V.P., Parmuzin E.I. Meteorologiya i gidrologiya, 2015. T. 40. № 6. pp. 411-419.
 23. Agoshkov V.I., Parmuzin E.I., Zakharova N.B., Shutyaev V.P., Informacionnye tekhnologii v distancionnom zondirovanii Zemli - RORSE 2018. Elektronnyj sbornik statej 16-j konferencii. Institut kosmicheskikh issledovanij Rossijskoj akademii nauk 2018. T. 33. № 3. pp. 149-160.
 24. Agoshkov V.I., Zalesny VB, Sheloput T.O. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana, 2020. V. 56. № 3. pp. 293-308.
 25. Shutyaev V.P., Agoshkov V.I., Parmuzin E.I., Le Dimet F.-X. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana, 2015. T. 51. № 3. pp. 342-350.
 26. Leontyev A.L., Nikitina A.V., Chumak M.I. Computational Mathematics and Information Technologies. Electronic journal. 2020. T. 1. № 1. pp. 1-11.
 27. Lavrova O.Yu., Soloviev D.M., Stochkov A.Ya., Shendrik V.D. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2014, Vol. 11, № 3, pp. 54-72.
 28. The official website of NASA Worldview.
worldview.earthdata.nasa.gov
 29. The official website of Roscosmos Geoportal, gptl.ru.
 30. Nikitina A.V., Sukhinov A.I., Peskova O.Yu. Izvestia TRTU. 2001. № 2 (20). pp. 32-35.
 31. The official website of Earth observing system,
eos.com/landviewer/account/pricing
 32. Rostovcev V.S. Iskusstvenny`e nejronny`e seti [Artificial neural networks]. St. Petersburg: Lan, 2019. 216 p.
-