

**Изучение состояния растительности в зоне влияния
Кирово-Чепецкого химического комбината с использованием
наземных наблюдений и космических методов исследования**

© 2013. Т. А. Адамович^{1,2}, к.г.н., н.с., Г. Я. Кантор^{1,2}, к.т.н., с.н.с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д.т.н., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный гуманитарный университет,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
e-mail: ecolab2@gmail.com

В статье приводятся данные по изучению состояния растительности в районе Кирово-Чепецкого химического комбината с использованием наземных наблюдений и космических методов исследований. Установлены видовые различия растений к аккумуляции тяжёлых металлов, соединений азота. Использование космических снимков и построение на их основе тематических карт позволили выявить динамику вегетационных индексов для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов.

The article provides data on the state of the vegetation in the area of Kirovo-Chepetsk chemical works, using ground-based observations and space research methods. Installed plant species differences in the accumulation of heavy metals, nitrogen compounds. The use of space images and to build on the basis of thematic maps have allowed to reveal the dynamics of vegetation indices for pine, deciduous forest and meadow phytocenoses.

Ключевые слова: Кирово-Чепецкий химический комбинат, наземные наблюдения, космические методы исследования, вегетационные индексы, растительность

Keywords: Kirovo-Chepetsky chemical plant, terrestrial observations, space methods of research, vegetation indices, vegetation

Территория в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината является одной из самых проблемных в исследуемом регионе со значительным антропогенным прессингом на окружающую среду. С 1938 г. на изучаемой территории построен и действует по настоящее время целый комплекс промышленных предприятий, включающий радиохимическое производство по переработке урана, которое функционировало до 1987 г. на Кирово-Чепецком химическом комбинате, крупные химические предприятия: ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецка», ЗАО «Завод минеральных удобрений КЧХК», ремонтно-механический завод и многие другие. В настоящее время все они объединены в филиал «КЧХК» ОАО «ОХК «УРАЛХИМ» [1].

На территории комбината находятся шламонакопители и хвостохранилища, содержащие свыше 1 млн 200 тыс. т токсичных отходов, в том числе около 400 т ртутьсодержащих и 437 тыс. т радиоактивных отходов. Хранилища отходов производства расположены в 2–3 км от санитарной зоны г. Кирово-Чепецка, в зоне санитарной охраны водозабора областного центра города Кирова с населением более

500 тыс. человек. За годы производственной деятельности всего комплекса предприятий КЧХК существенно возросли площади антропогенно нарушенных земель, водных и биологических экосистем.

Зональной растительностью Кирово-Чепецкого района, расположенного в центральной части Кировской области, являются пихтово-еловые, еловые и пихтовые леса, а также лиственные березняки и осинники, выросшие на месте вырубленных хвойных лесов. Лесопокрываемая площадь Кирово-Чепецкого района составляет 44,5%, площадь сельхозугодий – 45,5%. [2]. Большая часть лесов представлена черничным, долгомошным, сфагновым типами, произрастающими на заболоченных или бедных по плодородию участках. Незначительные по площади фрагменты южно-таёжных тёмнохвойных лесов сохраняются лишь в виде отдельных небольших участков в долинах рек Чепцы, Вятки. В настоящее время чаще встречаются вторичные березняки, реже осинники. На территории Кирово-Чепецкого района пихтарники практически не встречаются [3].

Флора сосудистых растений в Кирово-Чепецком районе насчитывает 883 вида, это 59%

от всей флоры области, 13 видов сосудистых растений занесены в Красную книгу Кировской области. Это пухонос альпийский (*Baeothryon alpinum* (L.) Egor.), осока средняя (*Carex media* R. Br.), венерин башмачок пятнистый (*Cypripedium guttatum* Sw.), венерин башмачок настоящий (*Cypripedium calceolus* L.), тайник сердцевидный (*Listera cordata* (L.) R. Br.), дремлик болотный (*Epipactis palustris* (L.) Crantz), пальчатокоренник майский (*Dactylorhiza majalis* (Reichenb.) и др. [4].

Современное состояние растительного покрова Кирово-Чепецкого района можно оценить как удовлетворительное. К основным факторам воздействия на лесные экосистемы следует отнести: проведение концентрированных рубок, сведение лесной растительности на значительных территориях и воздушное загрязнение от промышленных предприятий г. Кирово-Чепецка. Сведение коренной растительности свидетельствует о значительном снижении ресурсного и биосферного потенциала сохранившихся лесов.

В результате маршрутных обследований территории установлено, что в районе химкомбината встречаются растения из 35 семейств (выявлено 153 вида растений). Наиболее широко представлены семейства злаковых (14,8%), сложноцветных (13,2%), розоцветных (10%), бобовых (8%). Древостой представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*), елью гибридной (*Picea x fennica*), осинкой дрожащей (*Populus tremula*) и берёзой пушистой (*Betula pubescens*). Травянокустарничковый ярус достаточно разнообразен, встречается 24 вида растений [5].

В растительных образцах методами физико-химического анализа определялись следующие показатели: нитраты, тяжёлые металлы (кадмий, медь, свинец, никель, цинк, марганец, железо, ртуть), а также радионуклиды (стронций-90, цезий-137, калий-40, торий-232, радий-226). Удельные активности радионуклидов в образцах растительности определяли на бета-гамма-спектрометрическом комплексе с использованием программного обеспечения «Прогресс».

Наибольшей накопительной способностью по отношению к нитратам обладает крапива двудомная, поэтому проводили химический анализ растений данного вида на содержание нитритов и нитратов.

Содержание нитратов в растениях крапивы составило от 2,7 до 30,9 г/кг, что выше концентрации их в почве на 2–3 порядка. Больше нитратов накапливают стебли растений по

сравнению с листьями, в отношении нитритов – наибольшей аккумулирующей способностью обладали листья. По содержанию нитритов растения крапивы на участках мало различались. Высокие значения содержания нитратов в растениях крапивы установлены на участках, расположенных в нижнем течении р. Елховки, на берегу оз. Просное, в почве которых определены невысокие концентрации ионов. Высокую накопительную способность крапивы по отношению к нитратам можно объяснить тем, что азот является необходимым элементом питания растений, кроме того, нитраты могут поступать в растения не только из почвы, но и из водных объектов, находящихся в непосредственной близости от места произрастания растений [6].

В ходе проведённых исследований изучено содержание тяжёлых металлов в высших дикорастущих растениях различных видов на территории в зоне влияния КЧХК [7]. Выявлено, что хорошей способностью к накоплению всех тяжёлых металлов обладают растения бодяка полевого (листья) и крапивы (листья).

Выявлены видовые различия растений к аккумуляции тяжёлых металлов. Наилучшей способностью к накоплению меди обладает полынь обыкновенная. Для крапивы двудомной наибольшая способность установлена к аккумуляции ртути, никеля и цинка. Хорошим аккумулятором кадмия, меди и цинка являются растения бодяка полевого.

На участках мониторинга в значительной степени проявились видовые особенности растений к накоплению радионуклидов. По сравнению с другими радионуклидами, калий-40, радий-226 хорошо накапливаются растениями, особенно это характерно для крапивы двудомной. Торий-232 плохо накапливается всеми растениями. Таким образом, наибольшей аккумулирующей способностью по отношению к радионуклидам обладают бодяк полевой и крапива двудомная, для других видов растений характерна меньшая способность к накоплению радионуклидов. Наибольшие абсолютные значения удельной активности ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁸U характерны для растений участка, расположенного на берегу болота рядом с секцией № 3 шламонакопителя, вблизи с дренажной канавой, по которой ранее отводились радиоактивные отходы производства КЧХК [8].

Кроме наземных методов исследования при оценке состояния растительности использовали данные дистанционного зондирования Земли. Спектральные отражательные свойства растительности определяются следующими основ-

ными физическими факторами: оптическими свойствами листа (количество хлорофилла, каротина и других пигментов), геометрией покрова и угловым распределением листьев, отражательной способностью почв, на которых она находится, проективным покрытием почвы растительностью, углом освещения и углом наблюдения, состоянием атмосферы.

При увеличении экологической нагрузки содержание хлорофилла в растительности снижается, а отражательная способность увеличивается, особенно в красном диапазоне, из-за чего растительность приобретает жёлтый или хлоротичный оттенок. Важную роль играют и другие пигменты, в частности каротин, ксантофилл (жёлтый пигмент) и антоциан (красный пигмент). Некоторые виды деревьев выработывают в больших количествах антоциан и из-за этого имеют красный цвет [9].

Для оценки состояния растительности вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината использовались многозональные космические снимки за 1992, 2000, 2002, 2005 и 2007 гг., съемки в 8-ми спектральных диапазонах с разрешением 30 м, полученные с аппаратов Landsat. Снимки были сделаны в весенне-летний период (май–август). Также в работе применяли снимки за сентябрь 2007 и апрель 2008 гг. в 4-х спектральных диапазонах с разрешением 10 м, полученные с аппарата SPOT-5. Обработку снимков проводили в компьютерной программе ENVI 4.5.

Для количественной оценки состояния растительности на исследуемой территории с использованием методов ДЗЗ применяли вегетационный индекс NDVI и индекс влагосодержания NDWI, которые можно использовать как интегральные показатели. В работе рассчитывали один из индексов «зелёности» (Broadband Greenness) – Normalized Difference Vegetation Index нормализованный разностный индекс вегетации растений:

$$NDVI = (K_{nir} - K_{red}) / (K_{nir} + K_{red}),$$

где K – коэффициенты отражения электромагнитного излучения в видимом красном K_{red} (длины волн 0,63–0,69 мкм), ближнем инфракрасном K_{nir} (0,78–0,90 мкм) диапазонах соответственно (границы диапазонов приведены для сенсора ETM+ спутника Landsat-7).

Для растительности индекс принимает положительные значения от 0,2 до 0,8. Чем больше зелёная фитомасса, тем выше индекс. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, её сомкнутость, состо-

яние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Результатом анализа значений NDVI могут быть карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фитогидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты [10].

Кроме NDVI в работе был проведен расчёт индекса группы Canopy Water Content (индексы для оценки содержания влаги в растительном покрове) – Normalized Difference Water Index (нормализованный разностный водный индекс), который определяется как отношение разности и суммы коэффициентов поглощения волн 837 и 1241 мкм [11].

$$NDWI = (K_{837} - K_{1241}) / (K_{837} + K_{1241}),$$

где K – коэффициенты отражения электромагнитного излучения в ближнем инфракрасном (0,78–0,90 мкм) и дальнем инфракрасном (1,55–1,75 мкм) диапазонах соответственно (границы диапазонов приведены для сенсора ETM+ спутника Landsat-7).

Индексы данной группы разработаны для оценки содержания влаги в растительном покрове. Высокое влагосодержание характерно для здоровой растительности, которая быстрее растёт и более устойчива к пожарам. Индексы широко применяются при оценке пожароопасности на территории.

Расчёт индекса позволил получить карты NDVI и NDWI, по которым можно проследить динамику изменения состояния растительности, оценить разреженность растительного покрова, выявить зоны угнетения и восстановления, содержание влаги в растительности.

При оценке состояния растительности вблизи КЧХК методами аэрокосмического мониторинга были получены индексные карты, сделана оценка значений данных спектральных индексов отдельно для сосновых лесов, лиственных лесов и лугов. Это обусловлено различной чувствительностью данных типов растительности к воздействию природных факторов и негативных факторов среды [10 – 12].

При анализе данных, полученных в ходе дешифрирования, выявлено, что значения вегетационного индекса NDVI выше в летние месяцы (июль, август), чем в весенние (май). Это может быть объяснено сезонной динамикой вегетационного индекса, так как растения в течение сезона проходят все фазы вегетации. Время прохождения фаз меняется в зависимости от метеоусловий данного года. По

Таблица 1

Легенда к результатам распределения значений NDVI природных объектов в районе Кирово-Чепецкого химического комбината

Класс объектов	Значения индекса NDVI					
	12 июля 1992 г.	23 мая 2000 г.	25 июля 2002 г.	9 августа 2005 г.	16 августа 2007 г.	4 сентября 2007 г.
Водные объекты	-0,5-0	-0,5-(-0,25)	-0,5-(-0,25)	-0,25-0	-0,5-0	-0,5-0
Техническая зона	0-0,34	-0,25-0,05	-0,25-0,03	0-0,25	0-0,25	0-0,24
Сосновый лес	0,34-0,52	0,05-0,15	0,03-0,23	0,25-0,45	0,25-0,50	0,24-0,49
Лиственный лес	0,52-0,66	0-0,05	0,23-0,42	0,45-0,53	0,50-0,55	0,47-0,52
Луговая растительность	0,66-0,77	0,15-0,24	0,42-0,62	0,53-0,65	0,55-0,70	0,52-0,67

Таблица 2

Легенда к результатам распределения значений NDWI природных объектов в районе Кирово-Чепецкого химического комбината

Класс объектов	Значения индекса NDWI				
	12 июля 1992 г.	25 июля 2002 г.	9 августа 2005 г.	16 августа 2007 г.	4 сентября 2007 г.
Почвы	-0,5-(-0,25)	-0,5-(-0,3)	-0,5-(-0,25)	-0,5-(-0,25)	-0,5-(-0,3)
Техническая зона	-0,25-0,1	-0,3-0	-0,25-0	-0,25-0	-0,3-(-0,13)
Сосновый лес	0,1-0,22	0-0,1	0,1-0,3	0,1-0,25	0,06-0,24
Лиственный лес	0,22-0,26	0,1-0,2	0-0,25	0,1-0,25	-0,13-0,06
Луговая растительность	0,26-0,3	0,1-0,2	0-0,25	0-0,1	-0,13-0,06
Водные объекты	0,3-0,5	0,15-0,3	0,3-0,5	0,25-0,5	-0,13-0,06

мере смены фаз вегетативного развития меняются состав и содержание пигментов в листьях растений, увеличивается биомасса, количество хлорофилла в зелёных листьях растений. По мере накопления хлорофилла понижается яркость растений в видимой части спектра, особенно в красной зоне, и возрастает в инфракрасной. Следовательно, значение NDVI возрастает [13] (рис. 1, см. обложку, с. 2; табл. 1).

С разрушением хлорофилла в осенние месяцы наблюдается обратная картина – яркость в красной зоне возрастает, а в ближней инфракрасной уменьшается (табл.1).

Кроме того, выявлена тенденция к снижению значений вегетационного индекса для всех классов выделенных объектов при анализе снимков за июль 1992 и июль 2002 гг. (табл. 1). Например, для сосновых лесов выявлено значительное понижение значений вегетационного индекса за десятилетний период по сравнению с другими классами объектов (уменьшение NDVI в 10 раз). Это говорит о достоверности результатов, так как по литературным данным сосновые леса являются наиболее чувствительными индикаторами к различного рода загрязнениям окружающей среды. Таким образом, оценка данных дешифри-

рования свидетельствует о тенденции к ухудшению состояния растительности в зоне влияния объектов ОАО «Кирово-Чепецкий химический комбинат», что подтверждается и результатами полевых исследований.

В работе также был проведён анализ распределения индекса влагосодержания NDWI на территории исследования и фоновой территории в период с 1992 по 2007 гг. по данным спутников LANDSAT 7 и SPOT 5 (рис. 2, см. обложку, с. 2; табл. 2). Нормализованный дифференциальный водный индекс NDWI, основанный на отражательной способности растительности в этом диапазоне, позволяет выявить вариации растительного покрова, связанные с условиями увлажнения.

При расчёте индекса влагосодержания NDWI растительных объектов важно знать не только дату съёмки, но и особенности метеорологических условий года съёмки по сравнению со среднемноголетними показателями. Отражательные свойства изучаемых объектов заметно меняется после выпадения интенсивных осадков. Меняются спектральные характеристики луговой растительности и растительные ассоциации дешифрируются иначе, чем в засушливых условиях.

При анализе полученных данных выявлена зависимость между значениями NDWI и метеорологическими условиями (количеством осадков) в дни съёмки и за некоторый временной период до неё. Результаты анализов приведены в таблице 3 и на рисунке 3.

Максимальные значения индекса выявлены для сосновых, лиственных лесов и луговой растительности в июле 1992 и августе 2005 гг. В эти же годы отмечаются интенсивные выпадения осадков за несколько дней до съёмки (порядка 20 мм). Лиственные леса и луговая растительность в эти годы характеризуются самыми высокими значениями NDWI (0,22–0,26 и 0,25–0,5 соответственно). Более низкие показатели характерны для сосновых лесов (0,1–0,22), что может быть обусловлено особенностями спектра отражения хвои сосны в инфракрасном диапазоне в связи с её морфологией. Кроме того, время реакции различных видов растений на увлажнение различно: бы-

стрее всего на осадки реагируют луговые сообщества, а медленнее всего – хвойные деревья, что проявляется на картах, отображающих динамику NDWI после прошедших дождей. 2007 год является самым засушливым за исследуемый период, что можно чётко проследить по индексу влагосодержания, который для всех выделенных объектов отличается низкими значениями. Особенно засуха сказывается на состоянии луговых фитоценозов, где значение индекса находится в диапазоне от 0 до 0,1. В июле 2002 года значения NDWI также являются низкими, несмотря на большое количество выпавших осадков за двухнедельный период до съёмки. Объяснить это можно низким значением средней суммы активных температур за этот месяц и как следствие задержкой времени прохождения фаз вегетации.

Кроме того, при анализе распределения значений NDWI в районе Кирово-Чепецкого

Таблица 3

Средние значения NDWI природных объектов в районе Кирово-Чепецкого химического комбината

Классы объектов	12 июля 1992 г.	23 мая 2000 г.	25 июля 2002 г.	9 августа 2005 г.	16 августа 2007 г.	4 сентября 2007 г.
Сосновый лес	0,24	-0,05	0,063	0,22	0,13	0,09
Лиственный лес	0,31	-0,10	0,124	0,33	0,21	0,03
Луговая растительность	0,25	-0,046	0,16	0,21	0,007	0,04
Осадки 2 нед., мм	49,4	29,8	44,1	36,2	18,3	54,2
Осадки 1 мес., мм	66,2	75,2	45	70,1	91,1	69,5

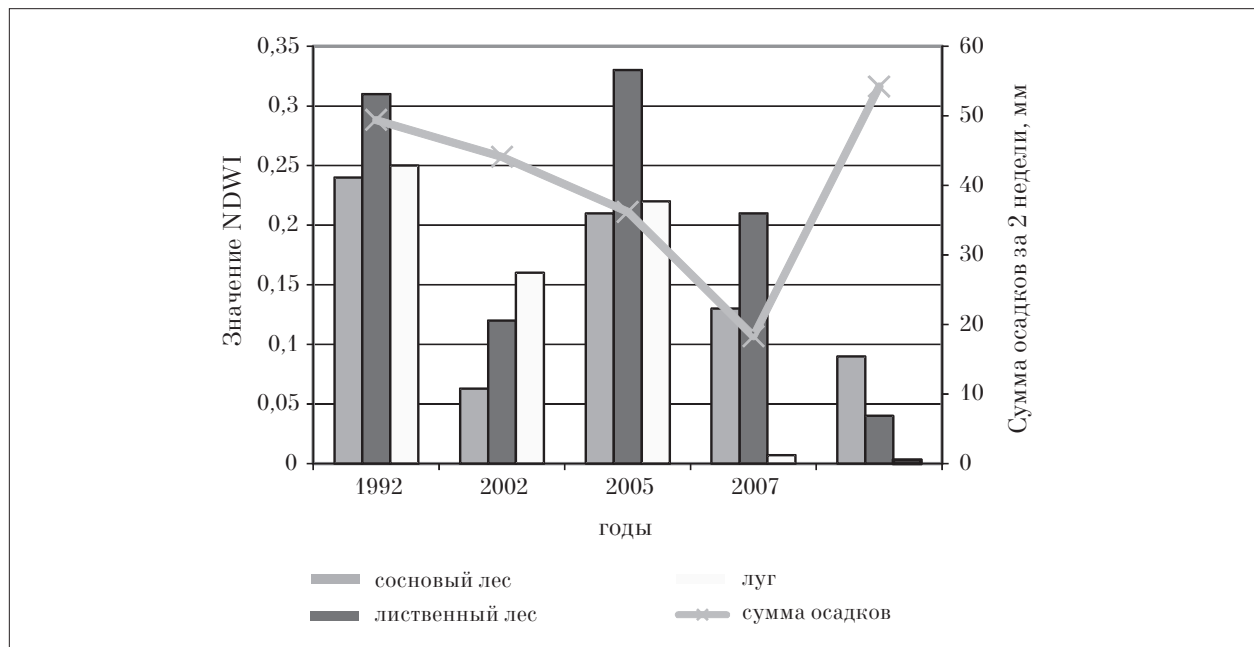


Рис. 3. Зависимость между значениями индекса влагосодержания NDWI и суммой осадков за две недели до момента съёмки

химического комбината за 15 лет была выявлена некоторая тенденция к усыханию лесов, что чётко прослеживается на рис. 3. Для сосновых лесов индекс влагосодержания за период с 1992 по 2007 гг. стал ниже на 62,5%, что может привести к серьёзным изменениям в состоянии лесных массивов. Проблема усыхания лесов характерна для всей Российской Федерации, в том числе для Кировской области, что подтверждается данными полевых исследований [14].

Таким образом, в ходе исследований установлены видовые различия растений к биоаккумуляции поллютантов и радионуклидов. Определено, что наибольшей накопительной способностью по отношению к азоту обладают растения крапивы двудомной и двуклосточника тростниковидного; по отношению к радионуклидам – крапива двудомная; по отношению к тяжёлым металлам (Hg, Ni, Mn, Pb) – полынь обыкновенная, крапива двудомная, двуклосточник тростниковидный. В связи с этим данные виды растений можно использовать в комплексном экологическом мониторинге на территории исследования [15].

Обработка разновременных, разномасштабных космических снимков и построение на их основе тематических карт позволили выявить тенденцию к снижению значений вегетационного индекса для всех классов изучаемых объектов, зависимость индекса влагосодержания от метеорологических условий года съёмки, тенденцию к усыханию лесов в районе влияния Кирово-Чепецкого химического комбината.

Используемые в работе аэрокосмические методы позволяют с высоким уровнем достоверности за длительный период наблюдений выявлять степень загрязнения природного комплекса и могут применяться как в системе комплексного экологического мониторинга окружающей природной среды в районе КЧХК, так и других территорий.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ в области знаний науки о Земле, экологии и рационального природопользования № НШ-2037.2012.5.

Литература

1. Ашихмина Т.Я., Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Лемешко А.П., Скугорева С.Г., Адамович Т.А. Изучение состояния природного комплекса в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Теоретическая и прикладная экология. № 3. 2010. С. 18–26.

2. Экологическая безопасность региона (Кировская область на рубеже веков) /Под ред. Т.Я. Ашихминой, М. А. Зайцева. Киров: Вятка, 2001. 416 с.

3. Оценка и мониторинг антропогенного влияния на природный комплекс и здоровье населения в районе промышленной агломерации гг. Киров–Кирово-Чепецк // Отчёт о НИР. Киров: ВятГГУ, 2002. 348 с.

4. Тарасова Е.М. Конспект флоры сосудистых растений Кирово-Чепецкого района Кировской области. Кирово-Чепецк, 2000. 54 с.

5. Отчёт о научно-исследовательской работе по теме «Разработка методов диагностики загрязнения окружающей среды по состоянию фототрофных и сапротрофных микробных комплексов. ВятГГУ, 2008. 143 с.

6. Адамович Т. А., Скугорева С. Г. Содержание нитратов и нитритов в растениях в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Экологические проблемы промышленных городов: Сборник научных трудов. Ч. 1. Саратов, 2011. С. 180–183.

7. Биологический мониторинг природно-техногенных систем / Под общ. ред. Т. Я. Ашихминой, Н. М. Алапкиной. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2011. 388 с.

8. Скугорева С. Г., Носкова Л. М. Содержание радионуклидов в почвах и дикорастущих растениях в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Современные проблемы биомониторинга и биоиндикации: Матер. VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. Ч. 2. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 202–205.

9. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование Земли и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

10. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. С. 219–225.

11. Zhangyan Jiang, Alfredo R. Huete, Jin Chen, Yunhao Chen, Jing Li, Guangjian Yan, Xiaoyu Zhang. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction.

12. Шепятева Я., Вяцкус А. Методика оценки состояния хвойных лесов в процессе лесоустройства при локальном загрязнении среды // Лесное хозяйство. 1986. № 10. С. 47–49.

13. Адамович Т. А., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я. Геоэкологическая оценка состояния растительности антропогенно нарушенных территорий с использованием методов аэрокосмического мониторинга // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Киров: ООО «Лобань», 2011. С. 106–109.

14. Леса Кировской области. Под редакцией А. И. Видякина, Т. Я. Ашихминой, С. Д. Новосёлова. Киров: ОАО «Кировская областная типография», 2008. 400 с.

15. Скугорева С. Г., Дабах Е. В., Адамович Т. А., Кантор Г. Я., Шуктомова И. И., Ашихмина Т. Я. Изучение состояния почв на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 37–46.