Методы и инструменты анализа данных ДЗЗ для выявления изменений растительного покрова, вызванных техногенными отходами и отвалами

В. П. Саворский[1, 2], Е. А. Лупян[2], В. И. Горный[3], Д. М. Ермаков[1], О. Ю. Панова[1, 2], А. М. Константинова[2]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия*
E-mail: savor@inbox.ru

[2] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

[3] *Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия*
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Воздействие опасных отходов на людей и окружающую среду в результате горнодобывающей деятельности формирует один из наиболее значительных глобальных экологических вызовов. В настоящее время этот вызов усугубляется в связи с повышением интенсивности добычи полезных ископаемых, разработкой менее богатых месторождений и переходом на разработку руд открытым способом. Это обусловлено существенным удешевлением такого способа добычи по сравнению с шахтным методом. Но при этом открытые карьеры полностью уничтожают окружающие участки ландшафта, формируя обширный кратер и различные источники техногенных отходов и отвалов (ИТОО). Эти источники зачастую включают тяжёлые металлы, кислотные осадки (растворы окислов серы), углеводороды и другие органические химические вещества. Исследование развития методов контроля состояния растительности как одного из наиболее значимых индикаторов экологической обстановки в интересах выявления влияния ИТОО на окружающую среду и составляет основную цель данной работы. В статье представлен аналитический обзор основных механизмов влияния типовых вредных выбросов ИТОО на растительные покровы и проанализированы возможные методы и подходы, позволяющие с использованием возможностей современных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли выявить изменения в растительном покрове, вызываемые влиянием ИТОО.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения Земли, информационные технологии, дистанционный мониторинг, лесные ресурсы, техногенные отходы и отвалы, опасные отходы

Одобрена к печати: 25.11.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-31-47

Введение

Воздействие опасных отходов на людей и окружающую среду в результате сельскохозяйственной, промышленной, военной и горнодобывающей деятельности формируют один из наиболее значительных глобальных экологических вызовов. Эти отходы часто включают тяжёлые металлы, кислотные осадки (растворы окислов серы), углеводороды и другие органические химические вещества. Традиционные полевые и лабораторные методы обнаружения и мониторинга таких отходов включают дорогостоящие и трудоёмкие мероприятия. Полезной альтернативой для их обнаружения и устранения являются методы аэрокосмического мониторинга (Slonecker et al., 2010). Мультиспектральные системы наблюдения, установленные на аэрокосмических носителях, были успешно использованы для спектрального и морфологического анализа опасных отходов на ландшафте, а гиперспектральные системы, наряду с этим, позволили определять состав загрязнителей по спектральным особенностям отражённого солнечного или собственного теплового излучения в десятках и сотнях спектральных компонент (Slonecker et al., 2010).

Одним из наиболее значимых источников загрязнений является горнодобывающая промышленность, поскольку, как отмечается в работе (Gardner, Sampat, 1998), «добыча минералов и металлов ... оказывает длительное и разрушительное воздействие на окружающую среду». Вызванные добычей минералов и металлов «движения материала в настоящее время превышают те, которые вызваны природными системами: одна лишь добыча полезных ископаемых ежегодно удаляет большую часть поверхности Земли, чем естественная эрозия рек» (Gardner, Sampat, 1998). Это связано с тем, что добыча полезных ископаемых требует извлечения как минералосодержащей руды, так и вскрышных (не содержащих руду) пород, покрывающих руду. Из всего этого извлечённого объёма далее используется очень малая часть. Так, для получения одной тонны меди извлекается 110 т вскрышной породы, из которой формируются отвалы, и такое же количество руды (Gardner, Sampat, 1998). При этом образуется огромное количество отходов. Например, объёмы отходов канадской горнодобывающей промышленности в 58 раз превышают объёмы бытовых отходов этой страны (Gardner, Sampat, 1998).

Одной из основных тенденций в развитии горнодобывающей промышленности является глобальный переход на добычу полезных ископаемых открытым способом. Это обусловлено существенным удешевлением такого способа добычи по сравнению с шахтным методом. Но при этом открытые карьеры полностью уничтожают окружающие участки ландшафта, формируя обширный кратер и различного рода отвалы и хвостохранилища. Так, крупнейший в мире карьер (Бингхем каньон, Юта, США) имеет глубину 1,5 км и ширину 2,5 км (Dirty..., 2004). При этом уже в настоящее время в США открытым способом добывается около 97 % металлов, а в мире — две третьих (Dirty..., 2004). Важно также отметить, что применение открытого способа добычи в современной горнодобывающей промышленности имеет тенденцию к расширению.

Существенным недостатком открытого способа добычи является то, что при его использовании значительно возрастают объёмы отходов, складируемых в отвалы. По оценкам, приведённым в докладе (Dirty..., 2004), объёмы отходов при открытом способе добычи возрастают в 8–10 раз. Доклад (Metals..., 1999) приводит ещё большую оценку, а именно от 8 до 50 раз. Отвалы формируют огромные холмы высотой порядка 100 м. Накопленные объёмы твёрдых отходов в отвалах представлены огромными величинами. Так, в США за всё время функционирования горнодобывающей промышленности было, вероятно, произведено не менее 90 млрд т отходов (Dirty..., 2004).

Согласно докладу (Mineral..., 2019), в США выплавляется 1260 т меди в год. А поскольку на одну тонну меди приходится 200 т отвалов и 110 т пустой породы (Dirty..., 2004), то в отвалы и хвостохранилища в США ежегодно опадает около 360 тыс. т отходов. В глобальном масштабе при общемировом производстве около 20 тыс. т меди в год отвалы и хвостохранилища пополняются ежегодно 6,2 млн т отходов. При этом наблюдается тенденция извлечения металлов из более бедных пород, что с использованием открытых карьеров существенно увеличивает скорость роста отвалов и хвостохранилищ.

Наряду со скальными породами в отвалы попадает значительное количество вредных веществ, существенно влияющих на экологическое состояние окружающей природной среды. К таким загрязнителям относятся, в частности, тяжёлые металлы, окислы серы, а также цианиды, используемые при добыче золота и серебра. Агентство охраны окружающей среды США (United States Environmental Protection Agency — EPA) считает, что до 40 % отходов горнодобывающей промышленности являются токсичными (Metals..., 1999).

Именно значительное абсолютное (по объёму) и относительное (по отношению к добываемому полезному ископаемому) увеличение объёмов отвалов и хвостохранилищ, а также их потенциально высокая токсичность определяют актуальность проблемы мониторинга влияния источников техногенных отходов и отвалов (ИТОО) на окружающую среду в общем и на растительное сообщество в частности. Важно при этом отметить, что масштабность данной проблемы предполагает применение соответствующих инструментов контроля, а именно проведения измерений не только непосредственно в карьерах и отвалах, но также и на примыкающих к ним территориях, в том числе лесных и сельскохозяйственных. В силу больших

размеров таких территории и значительного числа ИТОО, расположенных на территории нашей страны, их постоянный объективный мониторинг, видимо, не возможен без создания и использования новых технологий дистанционного спутникового мониторинга. Настоящая работа посвящена анализу возможности создания методов и систем для ведения такого мониторинга. В статье представлен аналитический обзор основных механизмов влияния типовых вредных выбросов ИТОО на растительные покровы. Также проанализированы возможные методы и подходы, позволяющие с использованием современных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выявить изменения в растительном покрове, вызываемые влиянием ИТОО.

Основные механизмы влияния техногенных отходов и отвалов на состояние растительного покрова прилегающих территорий

Типовые вредные выбросы отвалов и хвостохранилищ входят в список основных антропогенных факторов стресса, влияющих на наземный растительный покров (Lichtenthaler, 1998). К ним относятся, в частности:

1) тяжёлые металлы (свинец, кадмий и т. п.);
2) воздушные загрязнители (SO_2, NO, NO_2, NO_x и т. п.);
3) кислотные дожди, туманы и росы;
4) дефицит минералов в почве, зачастую вызываемый кислотными дождями;
5) кислый pH почвогрунтов и вод.

Тяжёлые металлы, как указано в работе (Титов и др., 2014) со ссылкой на Всемирную организацию здравоохранения, занимают второе место по нанесению ущерба здоровью человека, уступая пестицидам и опережая такие хорошо известные загрязнители окружающей среды, как двуокиси углерода и серы. Это обусловлено тем, что тяжёлые металлы — это химические элементы, отличающиеся высокой токсичностью для всех живых организмов и способностью по пищевым цепям поступать в организм человека и животных, что представляет серьёзную угрозу для их жизнедеятельности (Титов и др., 2014; Villiers et al., 2011). Придерживаясь наиболее распространённого определения, к тяжёлым металлам можно отнести элементы, обладающие свойствами металлов или металлоидов, имеющие плотность более 5 г/см^3, атомную массу свыше 40 Да, атомное число 23 и выше (Кузнецов, Дмитриева, 2006; Титов и др., 2014).

Основными антропогенными источниками тяжёлых металлов являются предприятия горнодобывающей и химической промышленности, энергетического комплекса, транспорта и сельского хозяйства (Никифорова, 2003). Техногенные загрязнения тяжёлыми металлами концентрируются в поверхностном слое почвогрунтов. При этом они представлены в основном в виде сульфатов, сульфидов и карбонатов, в то время как при техногенном загрязнении — в виде оксидов и свободных ионов (Ильин, 2012).

Растительность, произрастающая на антропогенно загрязнённых территориях, как показано в работе (Косицин, Алексеева-Попова, 1983), в большинстве случаев состоит из видов местной флоры, характеризуемой «сильно выраженной внутривидовой дифференциацией по устойчивости к тяжёлым металлам». При этом, как отмечено в монографии (Титов и др., 2014), «независимо от источника загрязнения территории тяжёлыми металлами повышение их уровня в почве практически всегда приводит к увеличению концентрации токсичных ионов в растениях. Поскольку тяжёлые металлы поступают в организм человека и животных именно с растительной пищей, создавая серьёзную угрозу их здоровью, вопросы, связанные с поглощением ионов металлов растениями и их транспортом в надземные органы, представляют не только чисто научный, но и большой практический интерес».

Результаты анализа, проведённого в работе (Титов и др., 2014), позволяют выделить основные механизмы влияния тяжёлых металлов на физиологические процессы растений, такие как рост, развитие, фотосинтез, дыхание и водный обмен. Эти механизмы в целом

достаточно хорошо изучены. Так, в результате проведённых масштабных исследований установлено, что в присутствии тяжёлых металлов не только тормозятся рост и развитие растений, но и происходят многочисленные структурно-функциональные изменения в фотосинтетическом аппарате, нарушаются процессы дыхания, эвапотранспирации, транспорта веществ и т.д. Это приводит как к снижению биопродуктивности, так и нередко к полному разрушению растительных сообществ (Алексеев, 2008). Можно выделить следующие основные факторы влияния ИТОО на растительные покровы в районах их расположения:

1. **Угнетение роста.** Этот фактор проявления токсичности тяжёлых металлов достаточно легко зарегистрировать даже визуально (Титов и др., 2007; Vassilev et al., 1998a). Многочисленные исследования растений показали, что воздействие тяжёлых металлов приводит к уменьшению линейных размеров корней и побегов, снижается также накопление биомассы растений (Титов и др., 2014). Максимальные усилия затрачиваются на изучение действия на растения кадмия как одного из наиболее токсичных тяжёлых металлов, в несколько меньшей степени изучены металлы-микроэлементы (медь, никель, цинк), а также свинец (Титов и др., 2014). Влияние других тяжёлых металлов на рост растений практически не изучается. Один из основных выводов заключается в том, что степень и характер ингибирующего действия тяжёлых металлов на рост, как и на другие физиологические процессы, зависит от их токсичности, концентрации в окружающей среде и продолжительности воздействия, а также от биологических особенностей вида (сорта, генотипа) и возрастного состояния растений (Казнина и др., 2012; Серегин, Иванов, 2001; Титов и др., 2014). В ноябре 1992 г. на итоговом митинге European Open Top Chamber Programme (Effects..., 1992) были представлены результаты исследований, проведённых на 13 европейских участках, по оценке влияния качества воздуха на физиологию, рост и урожайность трёх растений: *Vicia faba* (боб садовый, конский боб), *Phaseolus vulgaris* (фасоль обыкновенная), *Triticum aestivum* (пшеница мягкая). На некоторых из них были исследованы эффекты, вызванные повышенной концентрацией двуокиси серы. На бельгийском участке, например, было установлено, что малые концентрации не влияют на урожайность пшеницы мягкой, но приводят к уменьшению размеров корневой системы. Но этот эффект может быть объяснён также комбинированным влиянием двуокиси азота и двуокиси серы (De Temmerman, 1992). Иными словами, влияние двуокиси серы неоднозначно: даже при учёте взаимодействия с окислами азота и озона его воздействие трудно обнаружить. Уменьшение интенсивности фотосинтеза и эвапотранспирации является классической реакцией на умеренные концентрации двуокиси серы (Krupa, Arndt, 1990), что на четвёртый год эксперимента (1987) привело к снижению биопродуктивности. Кроме того, при последующем анализе было установлено, что умеренные концентрации двуокиси серы в летний период приводят к уменьшению корневой массы бука и пихты (Wollmer, Kottke, 1990),
2. **Воздействие на развитие.** Этот фактор изучен в гораздо меньшей степени, чем воздействие тяжёлых металлов на рост. Однако на основании имеющихся работ, посвящённых данному вопросу, а также результатов собственных исследований (Титов и др., 2014) можно сделать выводы о том, что повышенные концентрации тяжёлых металлов в окружающей среде задерживают развитие растений и наступление очередных фенологических фаз. А это зачастую приводит к увеличению продолжительности вегетационного периода. В ряде случаев растения вообще не переходят к генеративному развитию, несмотря на вполне благоприятные природно-климатические условия (Казнина и др., 2006; Khudsar et al., 2004; Vassilev et al., 1998b). В работе (Steubing, Fangmeier, 1986) описаны изменения флоры травяного покрова (*Milium effusum* и *Arum maculatum*) буковых лесов в результате загрязнения, вызванного малыми концентрациями двуокиси серы. Дальнейшие детали этого же исследования представлены в публикации (Steubing et al., 1989), где показано уменьшение индекса листового покрытия лесов Баварии после воздействия умеренных концентраций двуокиси серы в течение четырёх вегетативных сезонов.

3. **Воздействие на фотосинтез.** Фотосинтез отличается высокой чувствительностью к воздействию тяжёлых металлов, которые влияют на многие стороны этого процесса (Титов и др., 2014). При этом снижение скорости ассимиляции CO_2 в присутствии тяжёлых металлов может быть связано как с функциональными, так и со структурными изменениями в фотосинтетическом аппарате растений (Титов и др., 2007; Vassilev, 2002). В Хохенхаймовском долгосрочном эксперименте (Krupa, Arndt, 1990) было исследовано влияние двуокиси серы, озона и кислотных осадков на *Picea abies* (норвежская или европейская ель), *Abies alba* (белая пихта) и *Fagus sylvatica* (бук). Повышенная концентрация двуокиси серы привела к уменьшению общего содержания хлорофилла и ксантофиллов в хвойных иголках. Вместе с тем двуокись серы вызывает уменьшение интенсивности фотосинтеза у пихты, но не у ели (Krupa, Arndt, 1990; Schweizer, Arndt, 1990).
4. **Воздействие на дыхание.** Дыхание — основной источник энергии для жизнедеятельности растений, в том числе и для процесса их адаптации к неблагоприятным условиям внешней среды (Титов и др., 2014). Дыхание считается центральным звеном внутриклеточного метаболизма. Несмотря на то, что влияние тяжёлых металлов на процесс дыхания изучено по сравнению с другими физиологическими процессами довольно слабо (Титов и др., 2014), установлено, что оно является одним из наиболее устойчивых к воздействию тяжёлых металлов физиологическим процессом растений (Greger, Ögren, 1991; Romanowska et al., 2002). Поэтому в довольно широком диапазоне концентраций тяжёлые металлы не вызывают каких-либо явно выраженных сбоев в дыхании, и только их высокие концентрации приводят к снижению скорости этого процесса.
5. **Воздействие на водный обмен.** Как отмечено в работе (Титов и др., 2014), водный обмен играет важную роль в жизнедеятельности растений и формировании их продуктивности. Поддержание в клетках и тканях определённого водного баланса является обязательным условием не только нормального роста и развития растений, но и их устойчивости к факторам внешней среды (Barceló, Poschenrieder, 1990). По сравнению с ростом и фотосинтезом действие тяжёлых металлов на водный обмен растений изучено несколько меньше, хотя предполагают, что его нарушение под влиянием металлов является одной из главных причин их фитотоксичости (Vassilev et al., 1998a). Необходимо отметить, что двуокись серы вызывает также уменьшение интенсивности эвапотранспирации у пихты, но не у ели (Krupa, Arndt, 1990; Schweizer, Arndt, 1990).

Таким образом, видно, что загрязнители, выделяемые ИТОО, в том числе такие, как тяжёлые металлы и двуокись серы, могут существенно влиять на состояние растительного покрова. Однако степень этого влияния и его выраженность в значительной степени зависит как от вида растительности, так и от погодно-климатических условий, в которых это воздействие происходит. Поэтому для устранения влияния погодно-климатических условий необходимо проводить одновременный мониторинг испытуемых участков (предположительно загрязнённых) и контрольных (заведомо чистых) участков растительного покрова. При этом такие участки должны обладать близкими таксономическими характеристиками (порода (культура), рост, запас, бонитет) на начальную дату многолетнего мониторинга. То есть требуется достаточно хорошо продуманная и обоснованная система организации мониторинга.

Возможности использования спутниковых данных для определения характеристик растительного покрова, чувствительных к загрязнениям (ухудшению экологического состояния)

В настоящем разделе рассмотрены некоторые возможные подходы к анализу состояния растительного покрова для выявления влияния на него загрязнителей, характерных для ИТОО, по данным дистанционных спутниковых наблюдений.

Использование наблюдений в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра для картирования реакции растительности на загрязнители

Многочисленные исследования показали изменение спектров отражённого от растительности солнечного излучения при воздействии экотоксикантов, например солей тяжёлых металлов (Бузников, Тимофеев, 2010; Григорьева и др., 2018; Clevers et al., 2004; Imaging..., 2006; Purdy et al., 1986; Wang et al., 2008), и легли в основу понимания результатов многоспектральных и гиперспектральных спутниковых съёмок влияния ИТОО на окружающие экосистемы (ЭС).

Для картирования реакции растительности на воздействие со стороны ИТОО используется спутниковая многоспектральная съёмка среднего (Terra/Aqua MODIS (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016; Крицук и др., 2013)) и высокого (Landsat (Калабин и др., 2018)) геометрического разрешения.

Одним из наиболее распространённых подходов является картирование нормализованного дифференциального вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) на территорию, заведомо превышающую область воздействия ИТОО (Создание..., 2006). Расчёт NDVI осуществляется по формуле:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{r_4 - r_3}{r_4 + r_3}, \tag{1}$$

где r_3 и r_4 — коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) после атмосферной коррекции соответственно в красном и ближнем инфракрасном каналах спутниковых оптических сканеров. Для сканера TM (Landsat) используются каналы 3 (630–690 нм) и 4 (760–900 нм); для MODIS — каналы 1 (620–670 нм) и 2 (841–876 нм).

Методики исследования карт NDVI для выявления влияния ИТОО базируются на двух (иногда объединяемых) подходах. Первый состоит в анализе пространственного распределения характерных значений NDVI (например, средних или максимальных за вегетационный цикл) и выявлении пространственных аномалий (см., например, работы (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018)). Второй основан на анализе временного хода NDVI и выявлении нарушений стандартного для данной местности фенологического цикла (см., например, работу (Крицук и др., 2013)).

Следует отметить, что для решения поставленных задач, безусловно, могут использоваться различные вегетационные индексы, получаемые и на основе данных дистанционных наблюдений (Саворский и др., 2016), в том числе с использованием гиперспектральной информации (Savorskiy et al., 2016).

Картирование термодинамической реакции растительности на воздействие со стороны ИТОО: термодинамический индекс нарушенности экосистем

Развитие теоретических положений термодинамики ЭС (Jorgensen, Svirezhev, 2004) показало, что скорость испарения влаги с поверхности ЭС является мерой реакции ЭС на внешнее воздействие (Горный и др., 2011, 2013, 2019; Gornyy et al., 2010). На этой основе был предложен термодинамический индекс нарушенности экосистем (ТИНЭ) I_T:

$$I_T = \frac{Ex_C^0 - Ex_C}{Ex_C^0}, \tag{2}$$

где Ex_C^0 и Ex_C, Вт/м^2 — эксергии (Jorgensen, Svirezhev, 2004) поглощённой солнечной радиации, затрачиваемой на депонирование углерода фоновой (здоровой) и исследуемой нарушенной ЭС соответственно. Эксергия поглощённой ЭС солнечной радиации, затраченная на де-

понирование углерода, прямо пропорциональна количеству влаги, испаряемой ЭС (Горный и др., 2011; Gornyy et al., 2010; Jorgensen, Svirezhev, 2004):

$$Ex_C = 3{,}66E, \tag{3}$$

где E — удельная среднесуточная скорость испарения влаги с поверхности ЭС, кг/м^{2}с.

Для картирования ТИНЭ в масштабе 1:1 000 000 используются материалы съёмки ИК-тепловыми каналами спутников Terra/Aqua (MODIS) (Горный и др., 2011; Gornyy et al., 2010). При этом карты скорости испарения влаги с поверхности ЭС, необходимые для расчёта ТИНЭ, могут строиться с применением теплоинерционного подхода (Горный, 2004; Cracknell, Xue, 1996; Watson et al., 1971). Подход основан на усвоении результатов многократных суточных спутниковых изменений в математической модели суточного хода температуры поверхности. Также карты скорости испарения могут быть получены в качестве готового продукта (Running et al., 2017) на основе параметризации уравнения энергетического баланса поверхности ЭС. В рамках этого подхода используются результаты картирования дневной температуры земной поверхности и NDVI (Mu et al., 2011, 2013).

При крупномасштабных работах необходимы материалы тепловой космической съёмки, полученные в ночное время инструментами Terra/Aqua MODIS, а днём — Landsat (Горный и др., 2013). Для картирования скорости испарения влаги с поверхности ЭС применяется методика, основанная на многомерной корреляции изображений высокого пространственного разрешения в видимом и ближнем ИК-каналах с картами теплофизических характеристик поверхности ЭС худшего геометрического разрешения (Горный и др., 2017; Крицук и др., 2016).

Достоверность этих карт оценивается сравнением с результатами измерений потоков энергии и вещества на градиентных башнях (Buttar et al., 2019; Cleugh et al., 2007) или на лизиметрах. Среднеквадратические отклонения (СКО) картирования скорости испарения в сравнении с данными мониторинга на градиентных башнях на примере Австралии оценены как 1 мм/сут, или 28 Вт/м^2, что составляет 20–25 % относительной ошибки (Cleugh et al., 2007). Для стандартного продукта (Mu et al., 2011) СКО оценено в диапазоне 0,81–0,90 мм/сут, что соответствует 10–30 % относительной ошибки.

Мониторинг однородных участков растительного покрова, подверженных различному уровню влияния загрязнений

Как отмечено в предыдущем разделе, степень и выраженность воздействия ИТОО существенным образом зависит от вида растительного покрова и погодно-климатических условий, в которых это воздействие происходит (Казнина и др., 2012; Серегин, Иванов, 2001). В частности, для лесных покровов воздействие ИТОО зависит от биологических особенностей основных древесных пород, произрастающих на контролируемом участке, их возрастного состояния и бонитета. Важными характеристиками участков растительности, на которых производится контроль воздействия ИТОО, является также их пространственная однородность и связность.

Возможность выделения и многолетнего мониторинга однородных **по таксономии и погодно-климатическим условиям** участков лесных покровов по данным спутниковых наблюдений подтверждается рядом работ Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2016). Важным результатом этих работ является обоснование возможности формирования многолетних однородных рядов экспериментальных данных спутникового мониторинга для **участков с одинаковой или близкой таксономией** в начальном периоде наблюдений, что обеспечивает выявление многолетних трендов разностных характеристик участков, один из которых подвержен более интенсивному воздействию ИТОО, чем другой. Например, в случае, когда участки находятся на разном расстоянии и по одному азимуту от ИТОО, или даже при равном расстоянии, но один из них расположен по основному направлению розы ветров, а другой — по противоположному относительно ИТОО. Для выбора участков с разным уровнем загрязнений могут использоваться различные

подходы, в том числе и связанные с выявлением чистых и загрязнённых зон в районах ИТОО по данным сопутствующих и независимых дистанционных наблюдений. Например, в результате проведения анализа состояния снежного покрова и его динамики в зимний и весенний периоды по данным спутникового мониторинга.

При выборе контрольных участков надо, в частности, учитывать, что температурно-влажностные условия имеют не только временную, но и значительную пространственную изменчивость. Это приводит к существенным пространственным вариациям условий роста и развития растительности, что, в свою очередь, может маскировать и/или искажать влияние ИТОО. Поэтому при выделении однородных участков растительного покрова наряду с таксономическим подобием необходимо обеспечивать и **близость контрольных участков по их погодно-климатическим условиям**, прежде всего по синоптическим, сезонным и годовым показателям температурно-влажностных характеристик данных участков. Для этого необходимо использовать многолетние ряды температурно-влажностных параметров выделенных участков лесной территории.

Важно отметить, что для достоверного установления влияния ИТОО на растительность необходимо обеспечивать многолетний мониторинг, поскольку оно в значительном числе случаев зависит от кумулятивного накопления результатов влияния вредных веществ на испытуемых участках растительного покрова. Поэтому для изучения воздействия ИТОО на окружающую среду желательно проводить мониторинг долгоживущих растительных сообществ, к которым относятся, например, леса. Для проведения подобных исследований необходимо получать и анализировать многолетние ряды спутниковых наблюдений. Такой анализ должен обеспечить снижение влияния на получаемые оценки таких факторов, как значительная внутрисезонная и межгодовая изменчивость температурно-влажностных условий произрастания растений, и выявить значимые изменения, связанные с долговременным влиянием ИТОО на состояние растительного покрова регионов, в которых они располагаются. Отметим, что проведение таких исследований, на взгляд авторов, невозможно без создания специализированных баз данных, а также методов и инструментов для осуществления их анализа. Так, должны быть, в частности, созданы:

1) базы данных, содержащие информацию по ИТОО (по России и, возможно, прилегающим территориям), включающую в том числе контуры ИТОО;
2) базы данных тестовых однородных (по таксономии и погодно-климатическим характеристикам) участков леса в районах расположения каждого ИТОО, а также ряды их долговременных наблюдений;
3) методы формирования пар (или групп) тестовых участков леса, одни из которых не подвергаются существенному влиянию ИТОО, а другие находятся в зоне заметных загрязнений;
4) методы автоматизированного формирования рядов наблюдений различных индексов, в том числе NDVI (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018; Крицук и др., 2013), AVFI1600 (Aerosol Free Vegetation Index 1600 — вегетационный индекс, свободный от воздействия аэрозоля), LAI (Leaf Area Index — индекс листовой поверхности), DWSI5 (Disease Water Stress Index 5 — индекс водного стресса), EVI (Enhanced Vegetation Index — усовершенствованный вегетационный индекс), NDNI (Normalized Difference Nitrogen Index — нормализованный разностный азотный индекс), OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index — вегетационный индекс, оптимально учитывающий влияние почвы при несомкнутом растительном покрове), PEI (Potassium Emission Index — излучательный индекс калия), TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index — трансформированный относительный индекс поглощения в хлорофилле) (Саворский и др., 2016), описывающих различия в состоянии растительного покрова на тестовых участках, в том числе различия его временной динамики, например отражающие фенологические циклы;
5) методы автоматизированного формирования рядов термодинамических индексов нарушенности экосистем (Горный и др., 2011, 2013, 2019; Gornyy et al., 2010) для тестовых участков леса;

6) инструменты для анализа рядов различных вегетационных индексов и индексов нарушенности для выявления закономерностей поведения растительного покрова на тестовых участках леса.

Следует отметить, что для решения данных задач, безусловно, нужна техническая и информационная основа, которая могла бы обеспечить как возможность удобной работы с долговременными архивами спутниковых данных и результатов их обработки, так и инструментарий и вычислительные средства для проведения анализа. Такой основой, по мнению авторов, сегодня является Центр коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) и входящая в её состав уникальная научная установка «Вега-Science», которые развиваются при поддержке Минобрнауки (тема МОНИТОРИНГ № 01.20.0.2.00164) (Лупян и др., 2015, 2019).

Потенциальные возможности дистанционного выявления основных видов негативного влияния ИТОО на растительный покров

В настоящем разделе кратко проанализированы возможности использования данных дистанционных наблюдений для выявления рассмотренных выше процессов негативного воздействия ИТОО на растительный (в первую очередь лесной) покров.

Выявление нарушений роста растений. В качестве основного инструмента спутникового мониторинга при выявлении нарушений роста растений может быть рекомендован контроль нарушений роста по величинам NDVI (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018; Крицук и др., 2013) и подобным ему индексам, характеризующим состояние растительного покрова ($AVFI_{1600}$, LAI, DWSI5, EVI, NDNI, OSAVI, PEI, TCARI) (Саворский и др., 2016), на контролируемых тестовых участках, подверженных действию ИТОО, и референсных участках, не подверженных вредному воздействию или имеющих существенно меньшее воздействие ИТОО, в одних и тех же погодно-климатических условиях. При этом надёжное выявление нарушений возможно, видимо, только с использованием многолетних рядов наблюдений, поскольку нельзя исключать, что изменение растительного покрова в течение коротких периодов может оказаться незначительным. При длительных наблюдениях благодаря кумулятивному эффекту, вызываемому ИТОО, устойчивость наблюдаемых спектральных характеристик леса, а следовательно, и точность выявления нарушенности, может быть существенно повышена. Анализ различий в поведении индексов на тестовых участках, подверженных и неподверженных влиянию ИТОО, может позволить минимизировать факторы, не связанные с антропогенным воздействием, а вызванные, в частности, синоптической, сезонной и межгодовой изменчивостью температурно-влажностных условий развития растений, и тем самым выделить проявление влияния ИТОО. Следует отметить, что степень нарушения роста зависит от вида растительности. Поэтому при постоянном угнетении одних лесных пород другие могут не испытывать никаких изменений. Вследствие этого при многолетнем воздействии ИТОО вероятными становятся существенные изменения растительного покрова на тестовых участках.

Выявление нарушений развития. Привлечение NDVI или подобных ему спектральных индексов полезно также и для обнаружения нарушений роста растений. Однако в данном случае анализ следует сосредоточить на выявлении различий в сезонном ходе индексов (Саворский и др., 2018) для однородных участков, подверженных действию ИТОО, и референсных участков, не подверженных воздействию ИТОО, в одних и тех же погодно-климатических условиях для обнаружения возможных изменений сезонного фенологического цикла, что будет свидетельствовать об угнетении и в конечном итоге — гибели растительности, чувствительной к воздействию ИТОО.

Выявление нарушений процессов фотосинтеза. Выявление нарушений фотосинтетического аппарата является одной из наиболее проблематичных задач с точки зрения спутниковых наблюдений. Однако и в этом случае существует возможность косвенно оценить интенсивность

фотосинтеза по изменению показателей, характеризующих содержание хлорофилла, в частности по спектральному индексу TCARI (Саворский и др., 2018).

Выявление нарушений дыхания и водного обмена растений. Для выявления нарушенности лесного покрова, связанной с проблемами дыхания и водного обмена растений, целесообразно применить методический подход, описанный в работах (Горный и др., 2011, 2013, 2019; Gornyy et al., 2010).

Возможности выявления основных видов негативного влияния ИТОО на растительный покров

Задача	Характеристики, получаемые по данным ДЗЗ	Основные направления анализа рядов наблюдений
Выявление нарушений роста растений	NDVI, $AVFI_{1600}$, LAI	Анализ многолетних трендов; сравнительный анализ развития загрязнённых и незагрязнённых тестовых участков
Выявление нарушений развития	NDVI, $AVFI_{1600}$, LAI, DWSI5, EVI, NDNI, OSAVI, PEI, TCARI	Анализ многолетних трендов; анализ межгодовой изменчивости; сравнительный анализ развития загрязнённых и незагрязнённых тестовых участков
Выявление нарушений процессов фотосинтеза	TCARI, I_T (ТИНЭ)	Сравнительный анализ развития загрязнённых и незагрязнённых тестовых участков
Выявление нарушений дыхания	Ex_C (эксэргия, затраченная на депонирование углерода)	Сравнительный анализ развития загрязнённых и незагрязнённых тестовых участков
Выявление нарушений водного обмена растений	E (скорость испарения влаги)	Сравнительный анализ развития загрязнённых и незагрязнённых тестовых участков

В *таблице* приведено краткое обобщение возможности использования различных характеристик и методов анализа для выявления основных видов негативного влияния ИТОО на растительный покров.

Заключение

В работе проведён анализ задач и возможностей развития методов использования данных дистанционного спутникового зондирования для выявления изменений растительного покрова в зонах расположения крупных ИТОО. В том числе:

- выполнен обзор основных механизмов влияния наиболее распространённых выбросов ИТОО на состояние растительного покрова;
- проанализированы методы и подходы к выявлению изменений в растительном покрове, вызываемых влиянием ИТОО, по данным спутникового мониторинга;
- сформулированы требования к построению системы обработки и анализа спутниковых данных, необходимой для разработки методов и подходов к выявлению изменений в растительном покрове, вызываемых влиянием ИТОО.

В работе также отмечается, что технологической и информационной основой для разработки методов и подходов к выявлению изменений в растительном покрове, вызываемых влиянием ИТОО, по данным спутникового мониторинга может служить ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-24121 мк).

Литература

1. *Алексеев Ю. В.* Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
2. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. *Бузников А. А.*, *Тимофеев А. А.* Региональный экологический мониторинг: метод и аппаратно-программный комплекс для дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжёлыми металлами // Региональная экология. 2010. № 3(29). С. 7–8.
4. *Горный В. И.* Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 2. № 1. С. 10–16.
5. *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.* Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
6. *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Храмцов В. Н.* Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
7. *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Тронин А. А.*, *Киселев А. В.*, *Бровкина О. В.*, *Филиппович В. Е.*, *Станкевич С. А.*, *Лубский Н. С.* Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66.
8. *Горный В. И.*, *Киселев А. В.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Тронин А. А.* Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136.
9. *Григорьева О. В.*, *Дроздова И. В.*, *Шилин Б. В.* Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 78–88.
10. *Ильин В. Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе «почва – растение». Новосибирск: СО РАН, 2012. 220 с.
11. *Казнина Н. М.*, *Лайдинен Г. Ф.*, *Титов А. Ф.* Влияние кадмия на апикальные меристемы стебля растений ячменя // Онтогенез. 2006. Т. 37. № 6. С. 444–448.
12. *Казнина Н. М.*, *Титов А. Ф.*, *Топчиева Л. В.*, *Лайдинен Г. Ф.*, *Батова Ю. В.* Влияние возрастных различий на реакцию растений ячменя на действие кадмия // Физиология растений. 2012. Т. 59. № 1. С. 74–79.
13. *Калабин Г. В.*, *Евдокимова Г. А.*, *Горный В. И.* Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // Горный журн. № 2. 2010. С. 74–77.
14. *Калабин Г. В.*, *Моисеенко Т. И.*, *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Соромотин А. В.* Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению золоторудного месторождения «Олимпиада», отрабатываемого открытым способом // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
15. *Калабин Г. В.*, *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.* Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161.
16. *Калабин Г. В.*, *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.* Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187.
17. *Калабин Г. В.*, *Горный В. И.*, *Давидан Т. А.*, *Крицук С. Г.*, *Тронин А. А.* Реакция тундровой экосистемы на снятие техногенной нагрузки со стороны рудника «Валькумей» // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153.
18. *Косицин А. В.*, *Алексеева-Попова Н. В.* Действие тяжелых металлов на растения и механизмы металлоустойчивости // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С. 5–22.
19. *Крицук С. Г.*, *Горный В. И.*, *Калабин Г. В.*, *Латыпов И. Ш.* Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 228–237.
20. *Крицук С. Г.*, *Горный В. И.*, *Латыпов И. Ш.* Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
21. *Кузнецов Вл. В.*, *Дмитриева Г. А.* Физиология растений: учеб. М.: Высш. шк., 2006. 742 с.

22. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
23. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
24. *Никифорова Е. М.* Биогеохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами агроландшафтов Восточного Подмосковья // Геохим. экология и биогеохим. изучение таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 108–109.
25. *Саворский В. П.*, *Кашницкий А. В.*, *Константинова А. М.*, *Балашов И. В.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Толпин В. А.*, *Маклаков С. М.*, *Савченко Е. В.* Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 28-45.
26. *Саворский В. П.*, *Панова О. Ю.*, *Савченко Е. В.* Методы анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 13–30.
27. *Серегин И. В.*, *Иванов В. Б.* Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
28. Создание научно-технической продукции для реализации проекта развития системы дистанционного зондирования Земли из космоса в целях природопользования и охраны окружающей среды: отчет НИЦЭБ РАН о НИР. Ч. 4: Методические рекомендации по использованию методов дешифрирования космических снимков для получения количественных характеристик состояния окружающей среды, природных и антропогенных объектов / ред. В. И. Горный. СПб.: НИЦЭБ РАН, 2006. 162 с.
29. *Титов А. Ф.*, *Таланова В. В.*, *Казнина Н. М.*, *Лайдинен Г. Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 170 с.
30. *Титов А. Ф.*, *Казнина Н. М.*, *Таланова В. В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2014. 194 с.
31. *Barceló J.*, *Poschenrieder C.* Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review // J. Plant Nutrition. 1990. V. 13. P. 1–37.
32. *Buttar N. A.*, *Yongguang H.*, *Chuan Zh.*, *Tanny J.*, *Ullah I.*, *Aleem M.* Height effect of air temperature measurement on sensible heat flux estimation using flux variance method // Pakistan J. Agricultural Sciences. 2019. V. 56(3). P. 793–800. DOI: 10.21162/PAKJAS/19.8120.
33. *Cleugh H. A.*, *Leuning R.*, *Mu Q.*, *Running S. W.* Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 106. P. 285–304.
34. *Clevers J. G. P. W.*, *Kooistra L.*, *Salas A. L.* Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. P. 3883–3895.
35. *Cracknell A. P.*, *Xue Y.* Thermal inertia de-termination from space — a tutorial review // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 3. P. 431–461.
36. *De Temmerman L.*, *Vandermeiren K.*, *Guns M.* Effects of air filtration on spring wheat grown in open-top chambers at a rural site. I. Effect on growth, yield and dry matter partitioning // Environmental Pollution. 1992. V. 7. P. 1–5.
37. Dirty Metals: Mining, Communities and the Environment: A Report by Earthworks and Oxfam America. 2004. 34 p.
38. Effects of air pollution on agricultural crops in Europe. Results of the European Open-Top Chambers Project. Air Pollution Research Report 46 / eds. Jäger H. J., Unsworth M. H., de Temmerman L., Mathy P. Brussels, Commission of the European Communities, 1993.
39. *Gardner G.*, *Sampat P.* Mind over Matter: Recasting the Role of Materials in Our Lives. Worldwatch Paper 144. Worldwatch Institute, 1998. 60 p.
40. *Greger M.*, *Ögren E.* Direct and indirect effects of Cd2+ on photosynthesis in sugar beet (Beta vulgaris) // Physiologia Plantarum. 1991. V. 83. P. 129–135.
41. *Gornyy V. I.*, *Kritsuk S. G.*, *Latypov I. Sh.* Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance // J. Environmental Protection. 2010. V. 1. P. 242–250.
42. Imaging spectrometry / eds. Van der Meer F. D., de Long S. M. Springer, 2006. 403 p.

43. *Jorgensen J. S.*, *Svirezhev Yu. M.* Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsever, 2004. 366 p.
44. *Khudsar T.*, *Mahmooduzzafar I. M.*, *Sairam R. K.* Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in Artemisia annua // Biologia Plantarum. 2004. V. 48. No. 2. P. 255–260.
45. *Krupa S. G.*, *Arndt U.*, *Dempster J. P.*, *Manning W. J.* The Hohenheim long-term experiment: Effects of ozone, sulphur dioxide and simulated acidic precipitation on Tree Species in a Microcosm // Environmental Pollution. 1990. V. 68. Iss. 3–4. P. 193–481.
46. *Lichtenthaler H. K.* The stress concept in plants: an introduction // Annals of New York Academy of Sciences. 1998. V. 851. P. 187–198. URL: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb08993.x.
47. Metals from the Forest. Mining and forest degradation. World Conservation Union (IUCN). World Wide Fund for Nature (WWF). Gland, Switzerland, 1999. 40 p.
48. Mineral Commodity Summaries 2019 / U. S. Geological Survey. Reston, Virginia: 2019. 200 p. URL: https://doi.org/10.3133/70202434.
49. *Mu Q.*, *Zhao M.*, *Running S. W.* Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 8. P. 1781–1800.
50. *Mu Q.*, *Zhao M.*, *Running S. W.* MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. NASA Headquarters. Numerical Terradynamic Simulation Group, University of Montana, 2013. 55 p.
51. *Purdy T. L.*, *Milton N. M.*, *Eiswerth B. A.* Spectral reflectance of vegetation in the Idaho Cobalt District; potential for exploration using remote sensing: Open-File Report 86–587 / U. S. Geological Survey. 1986. 9 p. DOI: 10.3133/ofr86587.
52. *Romanowska E.*, *Igamberdiev A. V.*, *Parys E.*, *Gardeström P.* Stimulation of respiration by Pb2+ in detached leaves and mitochondria of C3 and C4 plants // Physiologia Plantarum. 2002. V. 116. No. 2. P. 148–154.
53. *Running S.*, *Mu Q.*, *Zhao M.* MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
54. *Savorskiy V. P.*, *Loupian E. A.*, *Balashov I. V.*, *Kashnitskiy A. V.*, *Konstantinjva A. M.*, *Tolpin V. A.*, *Uvarov I. A.*, *Kuznetsov O. O.*, *Maklakov S. M.*, *Panova O. Yu.*, *Savchenko E. V.* Vega-constellation tools to analize hyperspectral images // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives, 2016. XLI-B4. P. 235-242. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-235-2016.
55. *Schweizer B.*, *Arndt U.* CO_2/H_2O gas exchange parameters of one and two year old needles of spruce and fir // Environmental Pollution. 1990. V. 68. P. 275–292.
56. *Slonecker T.*, *Fisher G. B.*, *Aiello D. P.*, *Haack B.* Visible and Infrared Remote Imaging of Hazardous Waste: A Review // Remote Sensing. 2010. V. 2. No. 11. P. 2474–2508. DOI: 10.3390/rs2112474.
57. *Steubing L.*, *Fangmeier A.* Immissionssituation der Waldbodenvegetation. Sensitivität gegenüber SO_2 am natürlichen Standort // Allgemeine Forstzeitung. 1986. V. 21. P. 526–528.
58. *Steubing L.*, *Fangmeier A.*, *Both R.*, *Frankenfeld M.* Effects of SO_2, NO_2 and O_3 on population development and morphological and physiological parameters of native herb layer species in a beech forest // Environmental Pollution. 1989. V. 58. P. 281–302.
59. *Vassilev A.* Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview // J. Central European Agriculture. 2002. V. 4. No. 1. P. 65–74.
60. *Vassilev A.*, *Berova M.*, *Zlatev Z.* (1998a) Influence of Cd2+ on growth, chlorophyll content, and water relations in young barley plants // Biologia Plantarum. 1998. V. 41. No. 4. P. 601–606.
61. *Vassilev A.*, *Tsonev T.*, *Yordanov I.* (1998b) Physiological response of barley plants (*Hordeum vulgare* L.) to cadmium contamination in soil during ontogenesis // Environmental Pollution. 1998. V. 103. P. 289–297.
62. *Villiers F.*, *Ducruix C.*, *Hugouvieux V.*, *Jarno N.*, *Ezan E.*, *Garin J.*, *Junot C.*, *Bourguignon J.* Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches // Proteomics. 2011. V. 11. P. 1650–1663.
63. *Wang J.*, *Xu R.*, *Ma Y.*, *Miao L.*, *Cai R.*, *Chen Yu.* The research of air pollution based on spectral features in leaf surface of Ficus microcarpa in Guangzhou, China // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. V. 42. P. 73–83. DOI: 10.1007/s10661-007-9909-6.
64. *Watson K.*, *Rowan L. C.*, *Offield T. V.* Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images // Proc. 7th Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. Michigan, 1971. P. 2017–2041.
65. *Wollmer H.*, *Kottke K.* Fine root studies in situ and in the laboratory // Environmental Pollution. 1990. V. 68. P. 383–407.

Methods and information tools for analyzing remote sensing data to detect changes in vegetation caused by industrial waste and dumps

V. P. Savorskiy[1, 2], E. A. Loupian[2], V. I. Gornyy[3], D. M. Ermakov[1], O. Yu. Panova[1, 2], A. M. Konstantinova[2]

[1] *V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino 141190, Moscow region, Russia*
E-mail: savor@inbox.ru

[2] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

[3] *Scientific Research Center for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia*
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The impact of hazardous waste on people and the environment from mining is one of the most significant global environmental challenges. This effect is currently compounded due to an increase in the intensity of mining, with the development of less rich deposits and the transition to open pit mining. Open mining brings significant cost reduction compared to shaft mining. But at the same time open pits completely destroy the surrounding areas of the landscape forming an open vast crater and various sources of industrial waste and dumps (SIWD). These sources often include heavy metals, acid precipitates (solutions of sulfur oxides), hydrocarbons and other organic chemicals. The development of methods for monitoring the state of vegetation in the interests of monitoring the impact of SIWD on the environment is the main goal of the work. The paper presents an analytical review of the main mechanisms of the influence of typical SIWD harmful emissions on vegetation and analyzes possible methods and approaches that allow using the capabilities of satellite Earth remote sensing systems to identify changes in vegetation caused by the influence of SIWD.

Keywords: Earth satellite observation, information technology, remote monitoring, forest resources, industrial waste and dumps, hazardous waste

Accepted: 25.11.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-31-47

References

1. Alekseev Yu. V., *Tyazhelye metally v agrolandshafte* (Heavy metals in the agricultural landscape), Saint Petersburg: PIYaF RAN, 2008, 216 p.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
3. Buznikov A. A., Timofeev A. A., Regional'nyi ekologicheskii monitoring: metod i apparatno-programmnyi kompleks dlya distantsionnoi otsenki zagryazneniya indikatornykh vidov rastitel'nosti tyazhelymi metallami (Regional environmental monitoring: a method and hardware and software complex for remote assessment of pollution of indicator vegetation species with heavy metals), *Regional'naya ekologiya*, 2010, No. 3(29), pp. 7–8.
4. Gornyy V. I., Kosmicheskie izmeritel'nye metody infrakrasnogo teplovogo diapazona pri monitoringe potentsial'no opasnykh yavlenii i ob"ektov (Satellite measuring methods of infra-red heating range in monitoring of potentially dangerous phenomena and objects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 2, No. 1, pp. 10–16.
5. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Lapytov I. S., Termodinamicheskii podkhod dlya distantsionnogo kartografirovaniya narushennosti ekosistem (Thermodynamic approach for remote mapping of ecosystem disturbance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194.
6. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Khramtsov V. N., Verifikatsiya krupnomasshtabnykh kart termodinamicheskogo indeksa narushennosti ekosistem (Verification of large scale maps of thermodynamic index of ecosystem disturbance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212.

7. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S., Teplofizicheskie svoistva poverkhnosti gorodskoi sredy (po rezul'tatam sputnikovykh s"emok Sankt-Peterburga i Kieva) (Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 51–66.
8. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Termodinamicheskii podkhod k sputnikovomu kartirovaniyu nakoplennogo ekologicheskogo ushcherba lesnykh ekosistem (Thermodynamic approach to satellite mapping of accumulated ecological losses of forest ecosystems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 124–136.
9. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Eksperimental'noe obosnovanie vozmozhnostei videospektral'noi distantsionnoi indikatsii kratkovremennogo stressa rastitel'nosti (Experimental substantiation of the capabilities of videospectral remote indication of short-term vegetation stress), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 78–88.
10. Il'in V. B., *Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva – rastenie* (Heavy metals and non-metals in the soil – plant system), Novosibirsk: SO RAN, 2012, 220 p.
11. Kaznina N. M., Laidinen G. F., Titov A. F., Vliyanie kadmiya na apikal'nye meristemy steblya rastenii yachmenya (The effect of cadmium on the apical meristems of the stem of barley plants), *Ontogenez*, 2006, Vol. 37, No. 6, pp. 444–448.
12. Kaznina N. M., Titov A. F., Topchieva L. V., Laidinen G. F., Batova Yu. V., Vliyanie vozrastnykh razlichii na reaktsiyu rastenii yachmenya na deistvie kadmiya (The effect of age-related differences on the reaction of barley plants on the action of cadmium), *Fiziologiya rastenii*, 2012, Vol. 59, No. 1, pp. 74–79.
13. Kalabin G. V., Evdokimova G. A., Gornyy V. I., Otsenka dinamiki rastitel'nogo pokrova narushennykh territorii v protsesse snizheniya vozdeistviya kombinata "Severonikel'" na okruzhayushchuyu sredu (Estimation of dynamics of grows of derelict lands in process of deleterious effect decrease of OJSC "Severonickel Combine" on environment), *Gornyi zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 74–77.
14. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Sputnikovyi monitoring reaktsii rastitel'nogo pokrova na vozdeistvie predpriyatiya po osvoeniyu zolotorudnogo mestorozhdeniya "Olimpiada", otrabatyvaemogo otkrytym sposobom (Satellite monitoring of the reaction of the vegetation cover to the impact of the opencast mining company OLIMPIADA gold mine), *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2013, No. 1, pp. 177–184.
15. Kalabin G. V., Gorny V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact), *J. Mining Science*, 2014, No. 1, pp. 155–162.
16. Kalabin G. V., Gorny V. I., Kritsuk S. G., Environmental appraisal of the area of Kachkanar mining-and-processing plant by satellite monitoring data, *J. Mining Science*, 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 394–400.
17. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Davidan T. A., Kritsuk S. G., Tronin A. A., Reaktsiya tundrovoi ekosistemy na snyatie tekhnogennoi nagruzki so storony rudnika "Val'kumei" (The response of the tundra ecosystem to the removal of anthropogenic load from the Valkumey mine), *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2018, Vol. 2, pp. 146–153.
18. Kositsin A. V., Alekseeva-Popova N. V., Deistvie tyazhelykh metallov na rasteniya i mekhanizmy metalloustoichivosti (The effect of heavy metals on plants and mechanisms of metal resistance), *Rasteniya v ekstremal'nykh usloviyakh mineral'nogo pitaniya*, Leningrad: Nauka, 1983, pp. 5–22.
19. Kritsuk S. G., Gornyu V. I., Kalabin G. V., Latypov I. Sh., Zakonomernosti sezonnykh tsiklov vegetatsionnogo indeksa ekosistem v raione Sorskogo gorno-metallurgicheskogo kompleksa (Regularities of Vegetation Index Annual Cycles in the Region of Sorsk Mining and Metallurgical Complex), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 13, pp. 228–237.
20. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskikh kharakteristik zemnoi poverkhnosti (Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 277–290.
21. Kuznetsov Vl. V., Dmitrieva G. A., *Fiziologiya rastenii* (Plant physiology), Mocsow: Vysshaya shkola, 2006, 742 p.
22. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
23. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami

arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

24. Nikiforova E. M., Biogeokhimicheskaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami agrolandshaftov Vostochnogo Podmoskov'ya (Biogeochemical assessment of heavy metal pollution of agrolandscapes of the Eastern Moscow Region), *Geokhimicheskaya ekologiya i biogeokhimicheskoe izuchenie taksonov biosfery*, Mosco: Nauka, 2003, pp. 108–109.
25. Savorskiy V. P., Kashnitskiy A. V., Konstantinova A. M., Balashov I. V., Krasheninnikova Yu. S., Tolpin V. A., Maklakov S. M., Savchenko E. V., Vozmozhnosti analiza giperspektral'nykh indeksov v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa semeistva "Sozvezdie-Vega" (Capabilities of hyperspectral indices analysis of the Vega-Constellation remote monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 28–45.
26. Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Savchenko E. V., Metody analiza dannykh sputnikovogo monitoringa rastitel'nykh arealov dlya vyyavleniya uchastkov nezakonnogo zemledeliya pri provedenii spetsial'nykh ekspertiz (Methods for analyzing satellite monitoring data on plant areals to identify illegal crop fields in the conduct of special examinations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 13–30.
27. Seregin I. V., Ivanov V. B., Fiziologicheskie aspekty toksicheskogo deistviya kadmiya i svintsa na vysshie rasteniya (Physiological aspects of the toxic effects of cadmium and lead on higher plants), *Fiziologiya rastenii*, 2001, Vol. 48, No. 4, pp. 606–630.
28. *Sozdanie nauchno-tekhnicheskoi produktsii dlya realizatsii proekta razvitiya sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa v tselyakh prirodopol'zovaniya i okhrany okruzhayushchei sredy: otchet NITsEB RAN o NIR. Ch. 4: Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu metodov deshifrirovaniya kosmicheskikh snimkov dlya polucheniya kolichestvennykh kharakteristik sostoyaniya okruzhayushchei sredy, prirodnykh i antropogennykh ob"ektov* (Creation of scientific and technical products for the implementation of the project for the development of a system of remote sensing of the Earth from space for nature management and environmental protection: Research Center for Environmental Safety RAS tech. report. Vol. 4: Guidelines for the use of satellite image decoding methods to obtain quantitative characteristics of the state of the environment, natural and man-made objects), V. P. Gornyy (ed.), Saint Petersburg: Research Center for Environmental Safety RAS, 2006, 162 p.
29. Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F., *Ustoichivost' rastenii k tyazhelym metallam* (Plant resistance to heavy metals), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2007, 170 p.
30. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tyazhelye metally i rasteniya* (Heavy metals and plants), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2014, 194 p.
31. Barceló J., Poschenrieder C., Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review, *J. Plant Nutrition*, 1990, Vol. 13, pp. 1–37.
32. Buttar N. A., Yongguang H., Chuan Zh., Tanny J., Ullah I., Aleem M., Height effect of air temperature measurement on sensible heat flux estimation using flux variance method, *Pakistan J. Agricultural Sciences*, 2019. Vol. 56(3), pp. 793–800, DOI: 10.21162/PAKJAS/19.8120.
33. Cleugh H. A., Leuning R., Mu Q., Running S. W., Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 106, pp. 285–304.
34. Clevers J. G. P. W., Kooistra L., Salas A. L., Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 3883–3895.
35. Cracknell A. P., Xue Y., Thermal inertia de-termination from space — a tutorial review, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 3, pp. 431–461.
36. De Temmerman L., Vandermeiren K., Guns M., Effects of air filtration on spring wheat grown in open-top chambers at a rural site. I. Effect on growth, yield and dry matter partitioning, *Environmental Pollution*, 1992, Vol. 7, pp. 1–5.
37. *Dirty Metals: Mining*, *Communities and the Environment*: *A Report by Earthworks and Oxfam America*, 2004, 34 p.
38. *Effects of air pollution on agricultural crops in Europe. Results of the European Open-Top Chambers Project. Air Pollution Research Report 46*, Jäger H. J., Unsworth M. H., de Temmerman L., Mathy P. (eds.), Brussels, Commission of the European Communities, 1993.
39. Gardner G., Sampat P., *Mind over Matter: Recasting the Role of Materials in Our Lives. Worldwatch Paper 144*, Worldwatch Institute, 1998, 60 p.
40. Greger M., Ögren E., Direct and inderect effects of Cd2+ on photosynthesis in sugar beet (Beta vulgaris), *Physiologia Plantarum*, 1991, Vol. 83, pp. 129–135.
41. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance, *J. Environmental Protection*, 2010, Vol. 1, pp. 242–250.
42. *Imaging spectrometry*, Van der Meer F. D., de Long S. M. (eds.), Springer, 2006, 403 p.

43. Jorgensen J. S., Svirezhev Yu. M., *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*, Oxford: Elsevier, 2004, 366 p.
44. Khudsar T., Mahmooduzzafar I. M., Sairam R. K., Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in Artemisia annua, *Biologia Plantarum*, 2004, Vol. 48, No. 2, pp. 255–260.
45. Krupa S. G., Arndt U., Dempster J. P., Manning W. J., The Hohenheim long-term experiment: Effects of ozone, sulphur dioxide and simulated acidic precipitation on Tree Species in a Microcosm, *Environmental Pollution*, 1990, Vol. 68, Issue 3–4, pp. 193–481.
46. Lichtenthaler H. K., The stress concept in plants: an introduction, *Annals of New York Academy of Sciences*, 1998, Vol. 851, pp. 187–198, available at: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb08993.x.
47. *Metals from the Forest. Mining and forest degradation*, World Conservation Union (IUCN) and World Wide Fund for Nature (WWF), Gland, Switzerland, 1999, 40 p.
48. *Mineral commodity summaries 2019*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2019, 200 p., available at: https://doi.org/10.3133/70202434.
49. Mu Q., Zhao M., Running S. W., Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 8, pp. 1781–1800.
50. Mu Q., Zhao M., Running S. W., *MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration* (*ET*) *Product* (*NASA MOD16A2/A3*), *Algorithm Theoretical Basis Document*, *Collection 5*, NASA Headquarters, Numerical Terradynamic Simulation Group, The University of Montana, 2013, 55 p.
51. Purdy T. L., Milton N. M., Eiswerth B. A., *Spectral reflectance of vegetation in the Idaho Cobalt District; potential for exploration using remote sensing*, *Open-File Report 86-587*, U. S. Geological Survey, 1986, 9 p., DOI: 10.3133/ofr86587.
52. Romanowska E., Igamberdiev A. V., Parys E., Gardeström P., Stimulation of respiration by Pb2+ in detached leaves and mitochondria of C3 and C4 plants, *Physiologia Plantarum*, 2002, Vol. 116, No. 2, pp. 148–154.
53. Running S., Mu Q., Zhao M., *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017, DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
54. Savorskiy V. P., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskiy A. V., Konstantinjva A. M., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Kuznetsov O. O., Maklakov S. M., Panova O. Yu., Savchenko E. V., Vega-constellation tools to analize hyperspectral images, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2016, XLI-B4, pp. 235–242, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-235-2016.
55. Schweizer B., Arndt U., CO_2/H_2O gas exchange parameters of one and two year old needles of spruce and fir, *Environmental Pollution*, 1990, Vol. 68, pp. 275–292.
56. Slonecker T., Fisher G. B., Aiello D. P., Haack B., Visible and Infrared Remote Imaging of Hazardous Waste: A Review, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, No. 11, pp. 2474-2508, DOI: 10.3390/rs2112474.
57. Steubing L., Fangmeier A., Immissionssituation der Waldbodenvegetation. Sensitivität gegenüber SO_2 am natürlichen Standort, *Allgemeine Forstzeitung*, 1986, Vol. 21, pp. 526–528.
58. Steubing L., Fangmeier A., Both R., Frankenfeld M., Effects of SO_2, NO_2 and O_3 on population development and morphological and physiological parameters of native herb layer species in a beech forest, *Environmental Pollution*, 1989, Vol. 58, pp. 281–302.
59. Vassilev A., Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview, *J. Central European Agriculture*, 2002, Vol. 4, No. 1, pp. 65–74.
60. Vassilev A., Berova M., Zlatev Z. (1998a), Influence of Cd2+ on growth, chlorophyll content, and water relations in young barley plants, *Biologia Plantarum*, 1998, Vol. 41, No. 4, pp. 601–606.
61. Vassilev A., Tsonev T., Yordanov I. (1998b), Physiological response of barley plants (Hordeum vulgare L.) to cadmium contamination in soil during ontogenesis, *Environmental Pollution*, 1998, Vol. 103, pp. 289–297.
62. Villiers F., Ducruix C., Hugouvieux V., Jarno N., Ezan E., Garin J., Junot C., Bourguignon J., Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches, *Proteomics*, 2011, Vol. 11, pp. 1650–1663.
63. Wang J., Xu R., Ma Y., Miao L., Cai R., Chen Yu., The research of air pollution based on spectral features in leaf surface of Ficus microcarpa in Guangzhou, China, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, Vol. 42, pp. 73–83, DOI: 10.1007/s10661-007-9909-6.
64. Watson K., Rowan L. C., Offield T. V., Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images, *Proc. 7th Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, 1971, pp. 2017–2041.
65. Wollmer H., Kottke K., Fine root studies in situ and in the laboratory, *Environmental Pollution*, 1990, Vol. 68, pp. 383–407.