

2. Кирдяшев К.П., Чухланцев А.А., Шутко А.М. СВЧ-излучение земной поверхности при наличии растительного покрова // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 1. №. 2. С. 256-264.
3. Малышенко Ю.И., Роечко А.Н. Исследование радиотеплового излучения пшеничного массива в миллиметровом диапазоне радиоволн применительно к задачам дистанционного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 8. №. 4. С. 357-368.
4. Мелентьев В.В., Мателенок И.В. Опыт спутниковой СВЧ диагностики почвогрунтов // Вопросы радиометеорологии: сб. статей памяти В.Д. Степаненко. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, ООО «Изд-во «Балтийская печать». 2013 г. С. 283-304.
5. Уткин А.И., Дылис Н.В. Изучение вертикального распределения фитомассы в лесных фитоценозах // Бюл. МОИП, Отд. биол. 1966. Т. 71, Вып. 6. С. 79-91.
6. Kucharik C.J., Norman J.M., Gower S.T. Measurements of leaf orientation, light distribution and sunlit leaf area in a boreal aspen forest // Agricultural and Forest Meteorology. 1998. V. 91. No. 1. P. 127-148.
6. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Marliani F., Gai M. The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 2001. V. 39. No. 4. P. 873-884.
7. Stiles J.M., Sarabandi K. Electromagnetic scattering from grassland. I. A fully phase-coherent scattering model // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 2000. V. 38. No. 1. P. 339-348.

INSTRUMENT FOR INVESTIGATING OF THE SPATIAL STRUCTURE OF FOREST GROUND COVERS

I.V. MATELENOK¹, V.V. MELENTYEV²

¹ State University of Aerospace Instrumentation, SUAI

² International Centre for the promotion of UNIDO programmes and projects of State Polytechnic University

A new instrument for investigating of the spatial structure of forest ground covers was designed and implemented as prototype. The instrument was tested in field experiments on three sites located in Karelia. As a result of the works three-dimensional geometric models were constructed and the distributions of phytoelement inclination angles were estimated for studied fragments of ground covers.

СВЯЗЬ NDVI С НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССОЙ И ПРОДУКТИВНОСТЬЮ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ГРАДИЕНТЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

И.А. СМОРКАЛОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экологии растений и животных УрО РАН

Показана значимая корреляция NDVI с содержанием С_и в лесной подстилке и показателями надземной фитомассы и продуктивности лесных экосистем при увеличении загрязнения. Сделан вывод о некорректности использования однократных наземных измерений показателей растительности для построения модели зависимости NDVI от надземной фитомассы и продуктивности в градиенте промышленного загрязнения.

Среди возможных методов оценки биомассы и продуктивности фитоценозов все большее внимание уделяется технологиям дистанционного зондирования. Ряд моделей рассматривает нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) в качестве основной характеристики при расчетах показателей продуктивности, устанавливая связь между NDVI и фитомассой сообществ в виде логарифмических и линейных зависимостей (Елсаков, 2012; Мунени et al., 2001). Для определения связи между NDVI и параметрами растительности используют временные ряды соответствующих друг другу по срокам данных прямого наземного определения биомассы и данных дистанционного зондирования. В случае градиентов загрязнения, мы имеем ряд показателей биомассы, полученный для одной временной точки в сходных биотопических условиях. Возникает вопрос: можно ли использовать такой набор данных для получения калибровочной прямой с целью определения биомассы или продуктивности исследуемых

сообществ по показателям NDVI? Поиск ответа на него определил цель работы – оценить связь NDVI с надземной фитомассой и продуктивностью лесных экосистем в градиенте промышленного загрязнения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования были лесные экосистемы возле двух крупных предприятий цветной металлургии – Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) и Карабашского медеплавильного завода (КМЗ). СУМЗ, действующий с 1940 г., расположен на Среднем Урале (подзона южной тайги) около г. Ревды Свердловской обл., в 50 км к западу от Екатеринбурга. КМЗ, действующий с 1910 г., расположен на Южном Урале (предлесостепные сосново-березовые леса) около г. Карабаша, в 90 км к северо-западу от Челябинска. Состав выбросов предприятий сходен: основные ингредиенты – SO_2 и пылевые частицы с сорбированными металлами и металлоидами (Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, As, Hg и др.). Заводы также сопоставимы по мощности: в конце 1980-х годов каждый из них выбрасывал около 150–160 тыс. т поллютантов в год. В отличие от СУМЗ, действовавшего непрерывно с момента пуска (не считая перерыва на 6–11 мес. в 1941–1943 гг.), работа КМЗ была приостановлена с 1989 по 1997 г. Различия также касаются динамики выбросов в последнее десятилетие: в начале 2000-х годов выбросы СУМЗ составляли 30–60 тыс. т год⁻¹, а КМЗ – 80–95 тыс. т год⁻¹; в конце 2000-х годов выбросы обоих предприятий снизились до 16–25 тыс. т год⁻¹. После реконструкции производства в 2010 г. выбросы СУМЗ упали до 3–5 тыс. т год⁻¹, тогда как КМЗ продолжает выбрасывать 13–16 тыс. т год⁻¹.

В обоих районах хорошо выражены фоновая (в районе СУМЗ на удалении 20–33 км от завода, КМЗ – 18–32 км), буферная (СУМЗ – 4–10 км, КМЗ – 9–18 км) и импактная (СУМЗ – 1–3 км, КМЗ – 1–5 км) зоны, характеризующие последовательные стадии техногенной дигрессии лесных экосистем. В непосредственной близости от КМЗ образовалась обширная техногенная пустошь – специфический «лунный» ландшафт, частично переработанный эрозионными процессами, практически лишенный высшей растительности и естественного почвенного покрова (верхние горизонты почвы замещены техногенными поверхностными образованиями из эрозионных наносов). Возле СУМЗ техногенная пустошь представлена фрагментарно (только к востоку от завода) и не была включена в наш анализ.

В районе СУМЗ проанализированы ельники-пихтарники, где под действием загрязнения произошла закономерная смена растительных ассоциаций – от неморально-кисличных через разнотравно-злаковые до мохово-хвощовых и мертвопокровных. Почвенный покров представлен бурыми горно-лесными, дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами.

В районе КМЗ выбраны производные березняки, образовавшиеся на месте сосновых лесов. Загрязнение вызвало закономерную смену растительных ассоциаций – от разнотравных через разнотравно-злаковые до мертвопокровных. Почвенный покров представлен буроземами, дерново-подзолистыми и темно-серыми почвами.

Для каждого градиента использовали по 10 участков (на удалении от 1 до 33 км от завода). На каждом участке было заложено по 3 пробные площади в сходных ландшафтных и почвенно-растительных условиях (отстоят на 50–200 м друг от друга).

Для определения NDVI использовали снимки высокого разрешения со спутника Landsat 7/ETM+ (30м), сделанные в годы определения фитомассы: 24 июля 2008 г. для района СУМЗ и 30 июля 2010 г. – для района КМЗ. NDVI рассчитывали по формуле: $\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$, где NIR и RED – измеряемые яркости ближнего инфракрасного и красного каналов сканера спутника, соответственно. Поиск и обработку снимка проводили в спутниковом сервисе Vega-science (Лупян и др., 2011). Значение индекса на снимке определяли по GPS-координатам центра каждой пробной площади в программе QGIS v. 2.6.0 с использованием плагина «Point Sampling Tool». Всего получено 59 значений NDVI.

Наземные данные о фитомассе и продуктивности лесных экосистем на исследуемых пробных площадях были определены в 2008 г. в районе СУМЗ и в 2010 г. – в районе КМЗ (Усольцев и др., 2012).

В качестве оценки уровня загрязнения использовали содержание меди в лесной подстилке (Сморкалов, Воробейчик, 2016).

Для статистической обработки использовали регрессионный анализ и коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Учетная единица – пробная площадь.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

NDVI принимал значения в диапазоне 0.42–0.70 в районе СУМЗа и 0.03–0.86 – в районе КМЗ. Самые низкие значения NDVI были выявлены для площадок, расположенных на техногенной пустоши. Полученные нами абсолютные величины NDVI на фоновой территории 0.65–0.83 близки к значениям, которые обычно регистрируют для лесов умеренных широт в разгар вегетационного сезона (Медведева и др., 2010; Курганович, Голятина, 2015).

NDVI показал тесную связь с уровнем загрязнения (рис.1., табл.), что соответствует снижению биомассы травяно-кустарничкового яруса и изреживанию древостоя в исследуемых районах (Усольцев и др., 2012; Воробейчик и др., 2014).

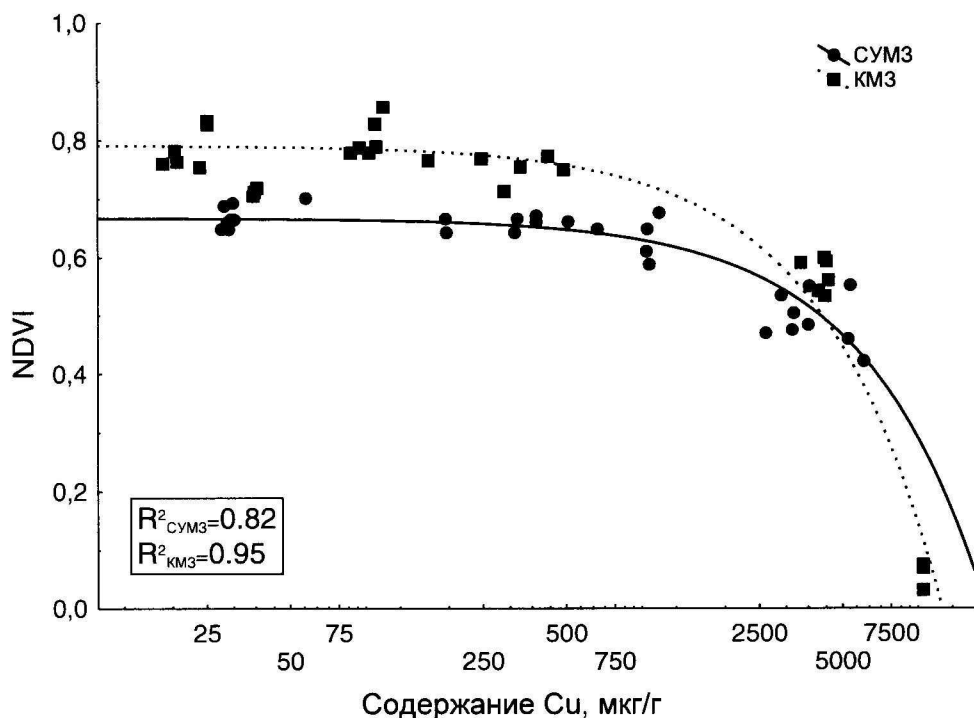


Рис. 1. Зависимость NDVI от содержания подвижной формы Cu в подстилке. Линия – линейная аппроксимация. Ось абсцисс логарифмирована

Таблица. Коэффициенты корреляции Спирмена значений NDVI с показателями фитомассы и чистой первичной продуктивности (ЧПП) (учетная единица – пробная площадь, $p=0.05$)

	Содержание Cu	Фитомасса				ЧПП			
		ствол	ветви	листва/хвоя	общая	ствол	ветви	листва/хвоя	общая
NDVI СУМЗ	-0.72*	0.79*	0.64*	0.52*	0.76*	0.61*	0.77*	0.66*	0.65*
NDVI КМЗ	-0.66*	0.39	0.43	0.39	0.41	0.44	0.50*	0.40	0.42

* – $p=0.01$

Также NDVI значимо коррелировал с показателями фитомассы ($p=0.05$) и продуктивности ($p=0.01$), в хвойных лесах эта связь была выражена сильнее, чем в

лиственных (рис. 2; табл.). В хвойных лесах NDVI сильнее всего коррелировал со стволовой фитомассой, а в лиственных – с массой ветвей. Из всех компонентов продуктивности наиболее сильная корреляция в обоих районах обнаружена для NDVI и ветвей.

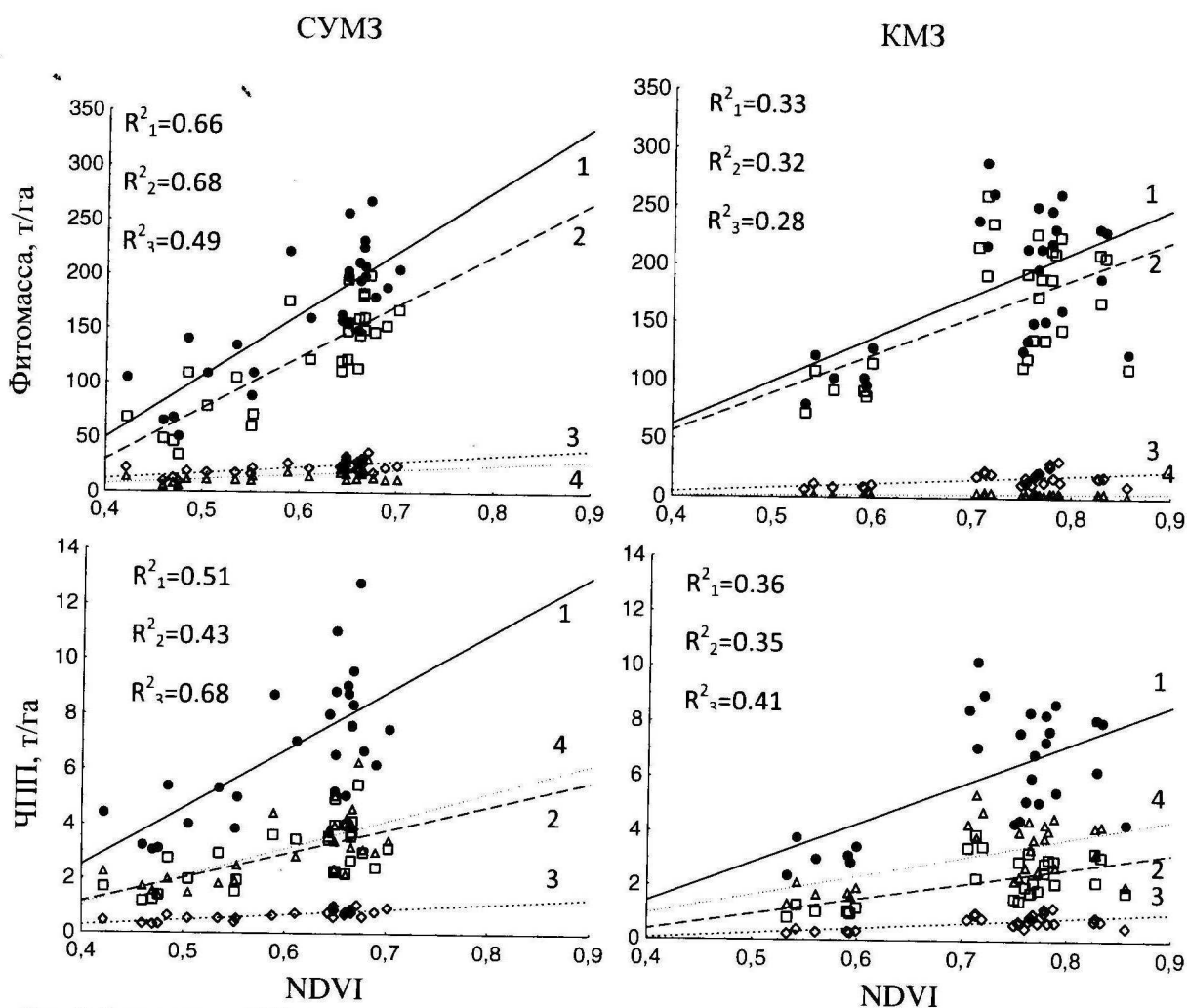


Рис. 2. Зависимость NDVI от фитомассы и продуктивности исследуемых фитоценозов ($p < 0.05$). Линии – линейная аппроксимация. 1–общее, 2–ствол, 3–ветви, 4–листва/хвоя

Таким образом, при сильной линейной зависимости NDVI от уровня загрязнения, взаимосвязь индекса с показателями фитомассы и продуктивности в градиенте загрязнения имеет, очевидно, более сложный характер и в любом случае значительно менее выражена. Это может быть связано с тем, что при увеличении загрязнения в листьях и хвое часто уменьшается содержание хлорофилла (Кизеев, 2011; Фазлиева, Кисилева, 2011). Меньшее содержание этого пигмента при одной и той же величине биомассы приводит к уменьшению NDVI, т.к. усиливается отражение в красной части спектра. Поэтому, для корректного определения биомассы или продуктивности растительности по NDVI в градиенте загрязнения, очевидно, необходимо все-таки иметь временные ряды наземных измерений для участков с разным уровнем загрязнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект №15-12-4-27).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробейчик Е.Л., Трубина М.Р., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448-458.
2. Елсаков В.В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 71-79.

3. Кизеев А.Н. Изменения морфологических и физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 3. С. 120-128.
4. Курганович К.А., Голятина М.А. Пространственно-временной отклик NDVI на изменение климатических характеристик в Забайкальском крае за период 2000-2014 гг // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 9. С. 10-20.
5. Лунян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А. et al. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности ("Вега") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190-198.
6. Медведева М.А., Елсаков В.В., Савин И.Ю., Барталев С.А. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 319-329.
7. Сморгалов И.А., Воробейчик Е.Л. Механизм стабильности эмиссии CO₂ из лесной подстилки в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 2016. № 1. С. 34-43.
8. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2012. 365 с.
9. Фазлиева Э.Р., Кисилева И.С. Биохимические реакции растений *Tussilago farfara* L. из природных местообитаний с разным уровнем техногенного загрязнения на избыток меди в среде // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2011. № 3. С. 246-256.
10. Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J., Kaufmann R.K. et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. V. 98. № 26. P. 14784-14789.

RELATIONSHIP NDVI WITH OVERGROUND PHYTOMASS AND PRODUCTIVITY OF FOREST ECOSYSTEMS IN GRADIENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION

I.A. SMORKALOV

Institute of plant and animal ecology, IPAE UB RAS

Demonstrated a significant correlation of NDVI with Cu content in forest litter, with aboveground biomass and productivity of forest ecosystems under increasing pollution. It is concluded that not correct to use one-time ground-based measurements of vegetation parameters for modeling of depending NDVI on the aboveground biomass of productivity in industrial pollution gradient.

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПОСТПОЖАРНЫХ УСУХАНИЙ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ MODIS

Ф.В. СТЫЦЕНКО, С.А. БАРТАЛЕВ, В.А. ЕГОРОВ, С.С. БАРТАЛЕВ

Институт космических исследований РАН

В работе представлен новый метод оценки постпожарных усыхания лесов, основанный на использовании спутниковых данных прибора MODIS. Метод является логическим продолжением ранее проведенных исследований по выявлению усыхания непосредственно в год пожара и позволяет детектировать усыхания в последующие годы. Представлены результаты выявления постпожарных усыхания лесов в период 2006-2014 годов. Полученные оценки показывают, что площадь приводящих к гибели лесов постпожарных усыхания возрастает примерно на 35%.

Пожары являются одним из основных факторов вызывающих усыхания и гибель лесных экосистем на территории России. В настоящее время ведется активный мониторинг лесных пожаров на основе спутниковых данных. В частности, в ИКИ РАН разработана технология позволяющая выявлять пожары и оценивать их площадь в оперативном режиме с последующим уточнением полученных измерений по мере получения данных более высокого пространственного разрешения (Барталев и др 2012). В оценке последствий воздействия пожаров важную роль играет задача оценки степени повреждения лесов, для решения которой был разработан метод, позволивший впервые получить инструментальные оценки площади погибших от пожаров лесов (Стыценко и др. 2013, Барталев и др. 2015). В частности в период с 2006 по 2014 по результатам