Возможности исследований влияния изменений климата на состояние растительного покрова: концепция проекта CLIVT

С.А. Барталев¹, М.Н. Жижин², Е.А. Лупян¹, М.Ю. Матвеев³, А.М. Матвеев¹, М.А. Медведева¹, И.Ю. Савин⁴, В.А. Толпин¹

¹Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: smis@iki.rssi.ru

²Геофизический центр РАН
119296, Москва, ул. Молодежная, д.3
E-mail: jjn@wdcb.ru

³Microsoft Rus LLC
121614, Москва, ул. Крылатская, д. 17/1
E-mail: mikhailm@microsoft.com

⁴Institute for the Protection and Security of the Citizen
European Commission - JRC
TP 266 - 21020 Ispra (VA) Italy
E-mail: igor.savin@jrc.it

Институт космических исследований Российской академии наук в сотрудничестве с рядом российских и международных научно-исследовательских организаций и при поддержке корпорации Майкрософт выполняет проект CLIVT, направленный на создание высокоэффективных компьютерных инструментов для анализа влияния глобальных изменений климата на состояние растительного покрова планеты. Исследования основаны на использовании банков данных спутниковых и метеорологических наблюдений, огромный и постоянный возрастающий объем которых требует привлечения больших вычислительных ресурсов и новых технологий хранения и обработки информации. Решение исследовательских задач, требующих высокопроизводительных вычислений, обеспечивается использованием кластера параллельных вычислений под операционной системой Windows Compute Cluster Server. Географическим фокусом исследований по проекту CLIVT является регион Северной Евразии, на территории которого наблюдаются наиболее значимые по масштабам и скорости изменения планетарного климата. Исследования предполагают совместный анализ долгосрочных данных о динамике наземных экосистем на основе спутниковых наблюдений и данных о метеорологических условиях с целью оценки и прогнозирования климатически индуцированной динамики растительности.

Проблема изменений климата и динамики растительности

Несмотря на продолжающиеся научные дискуссии о причинах наблюдаемого потепления климата, сам факт устойчивого и продолжающегося роста температуры воздуха на Земле в последнее столетие надежно подтверждается инструментальными измерениями и не вызывает сомнений [1]. Изучение влияния меняющейся климатической системы на другие компоненты геосистемы и человеческое сообщество является предметом многочисленных научных исследований, проводимых, в том числе, с целью своевременного выявления и оценки потенциальных угроз, а также выработки мер по смягчению возможных негативных последствий.

Анализ региональных вариаций климатических изменений показывает, что географически они являются сильно неоднородными, а наиболее интенсивный рост температуры воздуха наблюдается на территории Северной Евразии и, особенно, в Центральной Сибири [2].

Рассматривая потенциальное влияние изменений климата на растительность, являющуюся важнейшим компонентом большинства наземных экосистем, необходимо отметить, что соответствующие реакции растительного покрова могут проявляться в изменении характеристик продуктивности и режимов климатически зависимых возмущающих факторов, динамике ареалов распространения видов и во многих других аспектах. Получены свидетельства влияния изменений

климата на продолжительность вегетационного сезона, число и площадь пожаров, частоту вспышек массового размножения насекомых-вредителей в лесах, глубину сезонного оттаивания вечной мерзлоты и связанную с этим смену растительных сообществ [3-5].

Происходящие климатические сдвиги вызывают изменения в наземных экосистемах, которые часто носят трендовый характер и могут проявляться как на уровне структуры и характеристик растительного покрова, так и в режимах действия зависимых от климата факторов. Анализ многолетних трендов состояния наземных экосистем требует определения качественных и количественных параметров следующих динамических процессов:

- Изменение характеристик фенологической динамики растительности;
- Изменение биофизических характеристик растительности;
- Изменение режимов действия пожаров, а также биотических факторов воздействия на растительность;
 - Изменение режимов землепользования;
 - Изменение видового состава растительного покрова;
 - Смещение границ биомов и переходных зон между биомами.

Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что тренды состояния растительности могут вызываться также естественными сукцессиями, региональными изменениями социально-экономических условий и режимов землепользования или воздействием других факторов антропогенного характера, проявляющимися независимо или одновременно с климатическими сдвигами, что создает дополнительные сложности анализа и понимания причинно-следственных связей.

Возможности использования данных спутниковых наблюдений для оценки динамики растительного покрова в условиях климатических изменений

Использование данных спутниковых наблюдений является одним из эффективных путей изучения происходящих под влиянием климатических изменений трансформаций растительности на больших территориях. В частности, использование радиометра AVHRR со спутников серии NOAA, обеспечивающего наблюдения с пространственным разрешением около 1 км, позволило сформировать ряды наиболее продолжительных во времени глобальных наборов данных, охватывающих период с начала 1980-х годов по настоящее время [6]. Получаемый по результатам спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик поверхности и тесно коррелирующий с объемом зеленой биомассы нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI служит основой для оценки сезонной и многолетней динамики растительного покрова. Для компенсации влияния достаточно больших по абсолютной величине погрешностей географической привязки данных NOAA-AVHRR, получаемые на их основе многолетние глобальные ряды NDVI формируются, как правило, с пространственным разрешением 8 или 16 км. Одновременно для ослабления влияния облачного покрова и некоторых других мешающих факторов на основе ежедневных данных NOAA-AVHRR формируются композитные изображения NDVI с временной частотой, как правило, 10 или 15 дней.

Дальнейшее развитие технических возможностей непрерывных глобальных наблюдений за динамикой растительного покрова связано с появлением таких спутниковых систем, как SPOT-Vegetation (март 1998 года) и Terra-MODIS (февраль 2000 года). Несмотря на то, что полученные к настоящему времени с использованием этих приборов временные серии NDVI и других вегетационных индексов (например, OVNI [7]) отличаются относительно небольшой продолжительностью, для них характерно более высокое пространственное разрешение (250 м – 1 км) и большая гибкость в формировании композитных изображений с различной временной частотой.

Наличие указанных наборов спутниковых данных позволило к настоящему времени выполнить ряд исследований по оценке многолетней динамики растительности, в том числе, в северных широтах, где наблюдается наиболее существенное потепление климата. Исследования позволили

выявить наличие статистически значимых трендов значений вегетационного индекса в различных типах экосистем, а также трендов продолжительности вегетационного сезона, пространственно коррелирующих с территориями значимых климатических изменений [8, 9].

Цели и исследовательские подходы проекта CLIVT

Проект CLIVT (Climate Induced Vegetation Change Analysis Tool) выполняется Институтом космических исследований РАН при финансовой, технической и организационной поддержке корпорации Майкрософт в тесной кооперации с учеными ряда ведущих научных организаций, таких как Геофизический центр РАН, Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии и Исследовательский центр Майкрософт в Кембридже.

Исследования и разработки в рамках проекта CLIVT были инициированы благодаря наличию следующих основных предпосылок:

- Институтом космических исследований РАН сформированы супермассивы многолетних данных спутниковых наблюдений, охватывающих бореальные экосистемы Земли на континентальном и глобальном уровнях, а также разработаны методы обработки спутниковых данных для картографирования наземных экосистем, мониторинга динамики растительности под влиянием природных и антропогенных возмущающих факторов, оценки ее биофизических характеристик;
- Геофизическим центром РАН разработана технология параллельного извлечения данных и выявления изменений в очень больших архивах климатических данных;
- Компанией Майкрософт разработаны технологии высокопроизводительных вычислений, которые могут повысить эффективность научных исследований, связанных с обработкой больших объемов данных и требующих высоких скоростей вычислений.

Проект CLIVT предполагает совместное использование многолетних временных рядов спутниковых и метеорологических данных для территории Северной Евразии, являющейся географическим фокусом исследований, а также разработку новых методов и программных инструментов для изучения взаимосвязей между динамикой наземных экосистем и изменениями климата. При этом, наряду с континентальным охватом территории Северной Евразии предполагается проведение детальных исследований на ряде тестовых участков, выбранных в различных типах наземных экосистем с учетом величины и направленности климатических трендов.

В основу анализа динамики растительности положено использование полученных по результатам спутниковых наблюдений временных рядов спектрального вегетационного индекса NDVI, включая следующие наборы данных:

- данные прибора NOAA-AVHRR (набор данных GIMMS) за период 1982-2006 годов, имеющие временную частоту наблюдений 1/15 дней и пространственное разрешение 8 км;
- данные прибора SPOT-Vegetation за период 1998-2008 годов, имеющие временную частоту наблюдений 1/10 дней и пространственное разрешение $1 \, \mathrm{km}$;
- данные прибора Terra-MODIS за период 2002-2008 годов, имеющие ежедневную частоту наблюдений при величине пространственного разрешения 250 м.

Второй важной компонентой информационной основы исследований в рамках проекта CLIVT являются архивы климатических данных, в том числе такие как:

- данные NCEP/NCAR (Национального центра прогнозирования окружающей среды и Национального центра атмосферных исследований США) за период 1949-2006 годов, заданные в узлах регулярной сети с пространственным шагом $2.5^{\circ} x 2.5^{\circ}$ при временной частоте 1/6 часов;
- данные Европейского центра среднесрочного прогнозирования погоды (ECMWF) за период 1958-2002 годов, заданные в узлах регулярной сети с пространственным шагом $1.125^{\circ} x 1.125^{\circ}$ при временной частоте 1/6 часов.

Одним из путей совместного использования имеющихся из различных источников метеорологических данных является их объединение в распределенную систему данных GRID с помощью

системы поиска природных сценариев, разработанной Геофизическим центром в сотрудничестве с Исследовательской лабораторией Майкрософт в Кембридже. Функции отбора и обработки данных в каждом узле GRID могут быть расширены за счет подсистемы интеллектуального анализа с целью распределенного параллельного поиска погодных сценариев. Для исследований на выборочных тестовых участках предусматривается пространственная интерполяция климатических данных низкого разрешения из глобальных архивов на мезомасштабный уровень (10 км) с использованием модели атмосферной циркуляции ММ5 (http://www.mmm.ucar.edu/mm5). Учитывая, что использование мезомасштабной модели атмосферной циркуляции требует высокопроизводительных вычислений, в рамках проекта планируется ее реализация с использованием кластера параллельных вычислений под операционной системой Windows Compute Cluster Server 2003.

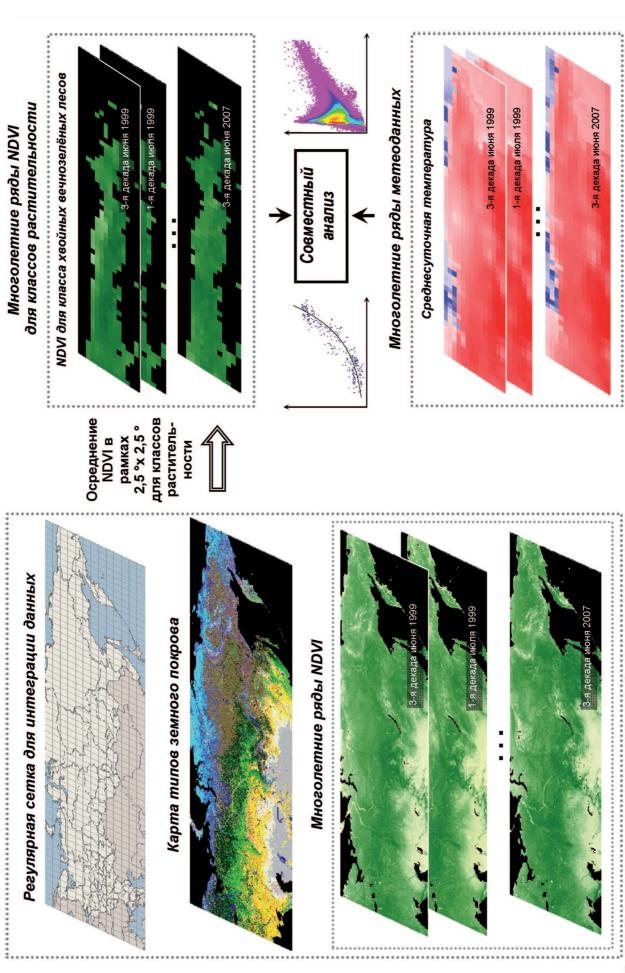
Исходя из имеющихся предпосылок для выполнения проекта CLIVT, программой исследований предусмотрено достижение следующих целей:

- Разработка методов комбинированного анализа временных серий спутниковых и метеорологических данных, включая анализ сценариев фенологической динамики растительности под влиянием изменений климата;
- Разработка алгоритмов выявления климатически индуцированных долгосрочных изменений состояния растительности; Разработка с использованием платформы Майкрософт научного инструментария анализа влияния климатических изменений на растительный покров на основе данных спутниковых и метеорологических наблюдений; Анализ изменений растительности на примере ряда тестовых регионов с различными типами экосистем (например, на границах тайгатундра и лес-степь) для проверки разработанных методов и программных инструментов.

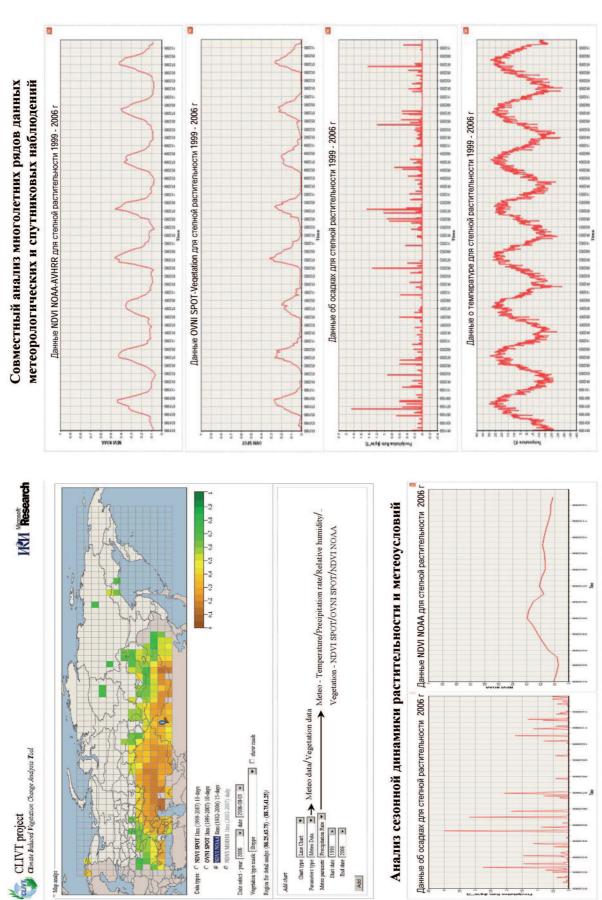
Концепцией проекта предусмотрен комбинированный анализ данных спутниковых и метеорологических наблюдений на уровне отдельных типов растительного покрова, что требует соответствующей пространственно-временной интеграции разнородных данных, выполняемой в соответствии с логической схемой, представленной на рис. 1. В качестве единой пространственной единицы интеграции при этом используются ячейки регулярной сети, принятые при формировании базы климатических данных (например 2.5° х 2.5° для базы данных NCEP/NCAR), а в качестве источника информации о пространственном распределении типов растительного покрова служит карта наземных экосистем Северной Евразии [10].

При исследовании реакций сезонной динамики растительного покрова на климатические изменения необходимо исключить или, по крайней мере, минимизировать влияние других возмущающих факторов, к числу которых, в частности, относятся лесные и другие растительные пожары. Поэтому при формировании интегрированной базы данные используются результаты картографирования по спутниковым данным повреждений растительного покрова пожарами [11] с целью исключения из анализа соответствующих поврежденным участкам значений спектральных вегетационных индексов.

Разработанные в рамках проекта CLIVT инструменты доступа к интегрированной базе данных открывают новые возможности анализа длинных временных рядов спутниковых и метеорологических наблюдений на уровне отдельных типов растительного покрова (рис. 2).



Puc. I. Логическая схема интеграции данных для анализа динамики растительности под влиянием изменений климата в рамках проекта CLIVT



Date select - year. 2006 • date: 2006-08-01 •

Region for detail analys: (86.25,43.75) - (88.75,41.25)

Meteo parametr. Precipitation Rate Start date 1999 •

NDVI SPOT 1km (1999-2007) 10-6ays

Рис. 2. Элементы интерфейса доступа к интегрированной базе спутниковых и климатических данных для анализа динамики растительности в рамках проекта СLIVT

Литература

- 1. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC I, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881 pp.
- 2. Overland, J.E., Wang, M.Y., and Bond, N. A. Recent temperature changes in the Western Arctic during spring // Journal of Climate, 15, 2002. P.1702-1716.
- 3. Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, and Nemani RR. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 // Nature 386 (6626). 1997. P.698-702.
- 4. Balzter, H., Gerard, F.F., George, C.T., Rowland, C.S., Jupp, T.E., McCallum, I., Shvidenko, A., Nilsson, S., Sukhinin, A., Onuchin, A. and Schmullius, C. Impact of the Arctic Oscillation pattern on interannual forest fire variability in Central Siberia // Geophysical Research Letters. 2005. doi:10.1029/2005GL022526.
- 5. Bogaert J, Zhou L, Tucker CJ, Myneni RB, and Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // J. Geophys. Res. 2002. 107:10.1029/2001JD001075.
- 6. Compton J. Tucker, Jorge E. Pinzon, Molly E. Brown, Daniel A. Slayback, Edwin W. Pak, Robert Mahone, Eric F. Vermote, Nazmi El Saleous. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // International Journal of Remote Sensing, Volume 26, Issue 20, October 2005. P. 4485 4498.
- 7. N. Gobron, B. Pinty, M. Verstraete and M. Taberner. VEGETATION An optimised FAPAR Algorithm Theoretical Basis Document // Institute for Environment and Sustainability. EUR Report No. 20146 EN. 2002. 19 pp.
- 8. C. Hüttich, M. Herold, C. Schmullius, V. Egorov, S.A. Bartalev. Indicators of Northern Eurasia's land-cover change trends from SPOT-VEGETATION time-series analysis 1998-2005 // International Journal of Remote Sensing, Volume 28, Issue 18, January 2007, P. 4199 4206.
- 9. . Bunn, A.G. and Goetz, S.J. Trends in Satellite-Observed Circumpolar Photosynthetic Activity from 1982 to 2003: The Influence of Seasonality, Cover Type, and Vegetation Density // Earth Interactions, Volume 10 (2006), № 12, 19 pp.
- 10. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. Vol. 24. № 9. 2003. P.1977-1982.
- 11. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. and Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation // International Journal of Remote Sensing. Vol. 28. № 6. 2007. P.1397-1404.