

Поочередно слоями были загружены изображения в редактор GIMP. Через вкладку «Каналы» и выбора функции «склейки» изображений была выбрана соответствующая цветовая комбинация (RGB). В итоге, смешение каналов в верной последовательности и дает цветное изображение. После, с помощью набора других функций редактора (фильтра, цветокоррекции и т.д.), можно далее улучшить его вид. На итоговой фотографии отчетливо виден спутник Рея в момент прохождения по диску Сатурна.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при проектировании космических аппаратов и автоматических межпланетных станций, существенно важным является рациональный выбор набора решаемых задач, качественной и высоконаучной целевой аппаратуры, а также подробнейшее планирование самих запусков. Такие миссии являются высоко финансово затратными и проектируются от нескольких до десятков лет. Поэтому часто в космос запускают аппаратуру, которая на земле уже не сравнится с современными технологиями, однако является проверенной и надежной. Трудно представить дальнейшее развитие фундаментальной науки без подобных средств познания Вселенной. Такие наблюдения вносят огромный вклад в понимание геологических, физических и химических процессов, которые объясняют расхождение эволюционных путей, проходящих по различным планетарным объектам, лунам, небольшим телам Солнечной системы (астероиды и кометы) и нашей планеты, в частности.

Библиографические ссылки

1. Яковлев О. И. Космическая радиофизика, Москва. 1998. 432 с.
2. Planetary Remote Sensing. An introduction and research guide to Planetary Remote Sensing. URL: <http://dgl.salemstate.edu>.

*УДК 630*58/64*

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА

С. В. Князева, Н. В. Королева, С. П. Эйдлина, Е. Н. Сочилова

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН г. Москва, Россия,
knsvetl@gmail.com

Представлены результаты дистанционной оценки динамики растительности на территории очага повреждения темнохвойной тайги сибирским шелкопрядом (1994-1995 г.) в районе Нижнего Приангарья. Оценка проведена на основе классификации снимков Landsat с использованием при выборе эталонов для обучения детальных снимков с пространственным разрешением 1 м Ресурс-П. По результатам классификации рассчитаны площади листовых и хвойных древостоев, подроста (возобновления), травяно-кустарниковой растительности, открытой почвы. В 2017 – 2018 г. возобновление наблюдается на участках, не

загронутых крупными пожарами – преимущественно хвойный подрост отмечен на 17% площади очага повреждения, лиственным подростом зарастает около 10%.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд; темнохвойные леса; погибшие древостои; спутниковые данные; достоверность классификации; лесовозобновление.

Введение. На территории Красноярского края периодически происходят вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, последствия которых наиболее разрушительны для темнохвойной тайги и могут привести к гибели древостоев на обширной территории и последующей смене лесной формации. В период 1878-1998 гг. на территории края зафиксированы девять крупных вспышек размножения сибирского шелкопряда [1]. Для дистанционной оценки состояния лесов используют различные спутниковые данные. Снимки низкого пространственного разрешения (NOAA, MODIS), позволяют за счет высокой периодичности съемки оперативно выявлять крупные очаги размножения вредителей. Для регионального и локального уровня мониторинга используют мультиспектральные данные относительно высокого (Landsat, Sentinel-2) и сверхвысокого пространственного разрешения (PlanetScope, WorldView-1, 2, 3). В большинстве исследований для оценки повреждений лесов насекомыми-вредителями и пожарами используются методы преобразования мультиспектральных данных (главных компонент, Tasseled Cup), расчета различных индексов (NDVI, NDMI (или коротковолновой SWVI), SWIR/NIR, RGI и др.), классификаторы и регрессионные модели [2,3,4,5,6]. Целью нашего исследования являлся дистанционный анализ состояния растительности на участке темнохвойных лесов Нижнего Приангарья (Красноярский край), где в 1994-1995 гг. образовался крупный очаг массовой вспышки размножения сибирского шелкопряда.

Основная часть. До вспышки сибирского шелкопряда на территории исследования, площадью около 100 тыс. га в районе Нижнего Приангарья, по данным лесоустройства 1992 г. произрастали темнохвойные леса с преобладанием пихты и смешанные с преобладанием берёзы и осины. Средний возраст хвойных насаждений составлял 80-130 лет.

Для оценки динамики лесовозобновления в очаге бывшего шелкопрядника проведена классификация снимков Landsat с использованием отечественных данных сверхвысокого пространственного разрешения Ресурс-П1. В качестве классификатора выбран алгоритм RandomForest, хорошо зарекомендовавший себя для решения задач автоматизированного дешифрирования характеристик лесов [6]. При создании обучающей выборки для снимка Landsat (22.06.2000) использованы данные таксации 1992 г. и лесопатологических обследований 1995 – 1996 гг. Для дистанционной оценки современного состояния растительности по снимкам Landsat (21.06.2014, 20.06.2017, 23.06.2018) выбор эталонных участков проводился на основе разносезонных снимков, полученных с российского спутника Ресурс-П1 аппаратурой Гео-

тон-Л1 с пространственным разрешением 1 м (22.07.2015 и 12.03.2018). Поскольку наземные данные полевых обследований растительности отсутствуют, выбор эталонов базировался на экспертной оценке результатов визуального дешифрирования снимков Ресурс-П1. Обучающие выборки оценивались по степени однородности эталонов методами сегментации изображений. Достоверность результатов классификации оценивалась по контрольной выборке эталонов на основе матрицы перепутывания и показателя каппы. Классификация проведена программными средствами свободно распространяемого пакета Rstudio.

При классификации снимка Landsat 7 (22.06.2000), полученного через 6 лет после начала массовой вспышки размножения шелкопряда, выделено 5 классов: сильно поврежденные и погибшие древостои, темнохвойный лес, лиственный лес, травяно-кустарниковая растительность, открытая почва. Очаг повреждения представлен крупными участками обесхвоенного леса (более 1000 га), небольшими куртинами сохранившегося здорового древостоя и участками леса в стадии сильно поврежденных и ослабленных. Через 4-5 лет после образования очага шелкопряда начинается вывал усохших деревьев и по мере накопления горючего материала возникают периодические пожары разной интенсивности. На территории очага зафиксировано два крупных пожара площадью более 20 тыс. га (2004 г., 2011 г.), и два меньших по площади пожаров (менее 10 тыс. га) в 2014 г. и 2016 г. Частые пожары мешают лесовозобновлению, т.к. наряду с сухостойными деревьями сгорает и подрост.

Классификация снимка Landsat 8 (21.06.2014) позволила с общей достоверностью 0,74 выделить 5 классов: темнохвойный лес, лиственный лес, подрост (смешанное возобновление), травяно-кустарниковая растительность, открытая почва. Выделить участки возобновления с преобладанием хвойных или лиственных пород не удалось ввиду небольшой площади. Лесовозобновление наблюдается на участках, не затронутых пожарами, с присутствием куртин древостоя и валежом. По данным Landsat 8 2017 и 2018 г. выделено 6 классов: 1 - темнохвойный лес, 2 - лиственный лес, 3 - преимущественно хвойный подрост, 4 - лиственный подрост и кустарники, 5 - травяно-кустарниковая растительность, 6 - открытая почва (рис.1). Эталоны для классов возобновления выбирались по летнему (22.07.2015) и весеннему (12.03.2018) снимкам Ресурс – П1 на основе визуального дешифрирования снимков (рис.2).

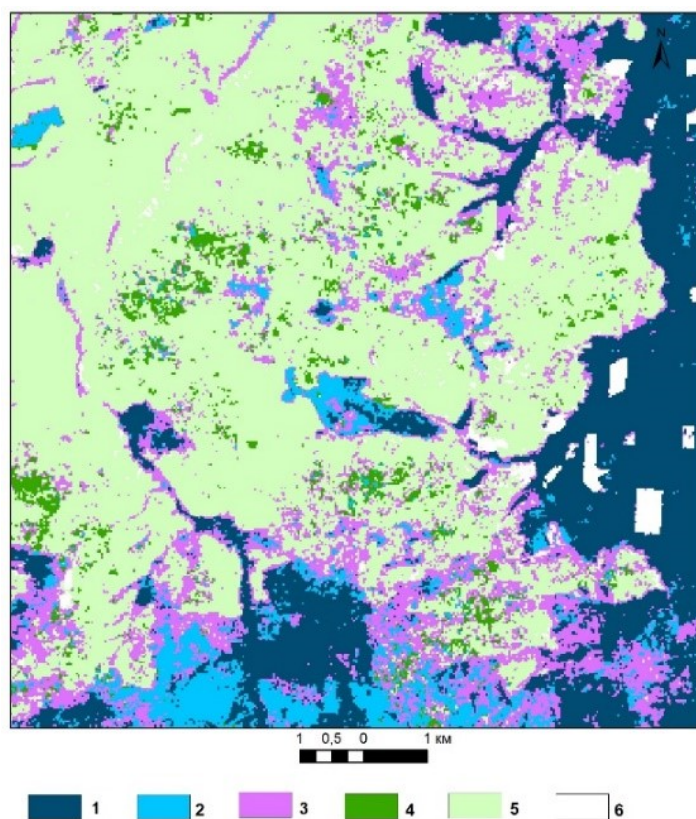


Рис.1 Фрагмент классификации снимка Landsat 8

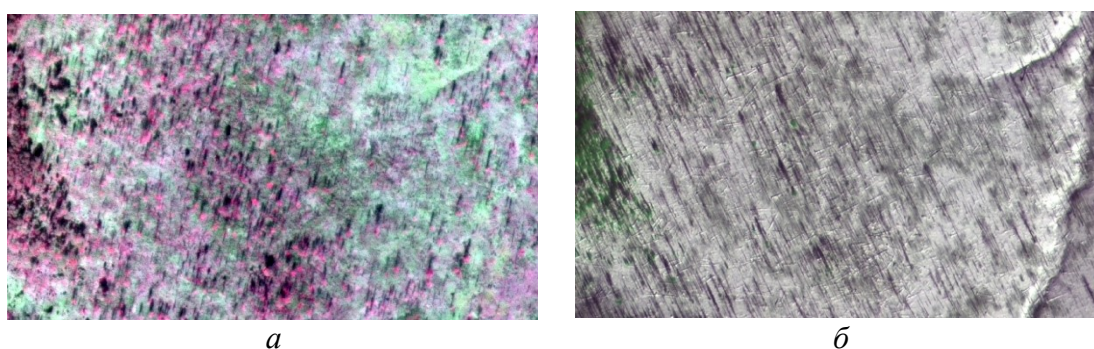


Рис.2 Примеры изображения эталонов класса «хвойный подрост» на Ресурс – П1
a – 22.07.2015, *б* – 12.03.2018

Общая достоверность классификаций алгоритмом Random Forest достаточно высокая – индекс каппа равен 0,9 и 0,93. Классы преимущественно хвойного или лиственного возобновления распознаются с вероятностью около 80% (перепутывание происходит в основном с классами «травяно-кустарниковая растительность» и «лиственный лес», особенно это характерно для лиственного возобновления).

В границах очага бывшего шелкопрядника рассчитаны доли площади типов растительности по результатам классификаций 2014 – 2018 гг. В 2014 г. лесовозобновление наблюдается примерно на 6 % площади шелкопрядника. Значения площадей для 2017 и 2018 г. были усреднены, поскольку практически никаких изменений на территории шелкопрядника за год не зафиксиро-

вано (пожары отсутствовали). Через 23 года после воздействия вредителя активный процесс естественного возобновления преимущественно хвойным подростом происходит на 17 % площади очага, лиственным подростом зарастает около 10 %. Травяно-кустарниковой растительностью без видимых признаков лесовозобновления покрыто около 62% площади бывшего шелкопряда.

Заключение. На основе результатов классификации снимков Landsat 2014 – 2018 г. проведена оценка площадных характеристик основных типов растительности в границах бывшего очага сибирского шелкопряда. Использование для автоматизированного дешифрирования и верификации космических снимков сверхвысокого разрешения позволило достоверно распознать классы преимущественно хвойного или лиственного возобновления. Дистанционная оценка состояния растительности по космическим снимкам Landsat дает представление о динамике процесса естественного лесовозобновления на территории бывшего очага шелкопряда и обеспечивает пространственную основу для оптимизации планирования наземных обследований.

Исследование выполнено в рамках темы Госзадания ЦЭПЛ РАН на 2019 г. (АААА-А18-118052400130-7).

Библиографические ссылки

1. Кондаков Ю.П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края. Энтомологические исследования в Сибири. Выпуск 2. Красноярск. 2002. С. 25–74.
2. Харук В. И., Рэнсон К. Дж., Кузьмичев В. В., Буренина Т. А., Тихомиров А. Ю., Им С. Т. Съемка «Landsat» в анализе шелкопряда Южной Сибири. Исследование Земли из космоса. 2002. № 4. С. 79–90
3. Wulder M. A., White J. C., Bentz B., Alvarez M. F., Coops N. C. Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage. Remote Sensing of Environment. 2006. N 101. P. 150–166.
4. Vogelmann J. E., Tolk B., Zhu Z. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. Remote Sensing of Environment. 2009. N 113. P. 1739–1748.
5. Жирин В. М., Князева С. В., Эйшлина С. П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом. Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14
6. Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. V. 60. P. 49–60.