

DOI 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12

УДК 528.88: 504.062

ДИСТАНЦИОННЫЙ ВЫСОКОДЕТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ ЗАРАСТАНИЯ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2019 г.

А.А. Медведев, Н.О. Тельнова*, А.В. Кудиков

*Институт географии РАН**Россия, 119017 Москва, Старомонетный пер., 29**E-mail: natalia.telnova@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2019

Приведены результаты многолетнего дистанционного мониторинга зарастания залежи древесной растительностью по разновременным космическим снимкам сверхвысокого разрешения и сверхвысокодетальным данным оптической съемки с БПЛА. Показана применимость фотограмметрических плотных облаков точек для трехмерной реконструкции структурных параметров древесной растительности на заброшенных сельскохозяйственных землях с использованием цифровой модели высот древесного полога. Получены пространственно распределенные данные о динамике расселения древесной растительности по залежи в 2005–2018 гг., высоте современного древесного полога, его вертикальном приросте, плотности деревьев и сомкнутости полога. Выявлена пространственно-временная гетерогенность динамики зарастания залежи древесной растительностью. В первые годы зарастания залежи наиболее интенсивный прирост и расселение древесной растительности происходило со стороны леса, и привело к формированию очень плотного, но низковысотного древостоя на участках, примыкающих к лесным массивам. В более поздний период преобладает очаговое зарастание, отличающееся очень интенсивным вертикальным приростом древесного полога.

Ключевые слова: Центральное Нечерноземье, залежи, постагрогенные сукцессии, БПЛА, цифровые модели древесного полога.

Выведение из оборота сельскохозяйственных земель и их перевод в залежи с последующим зарастанием естественной растительностью является значимым типом изменений наземного покрова и структуры использования земель во многих странах мира. Только в России в течение XX века из оборота было выведено около 70 млн. га сельскохозяйственных угодий, из них около 2/3 – в ходе кризиса второй половины 1980 – 1990-х гг. (Люри и др., 2010). С 2000-х гг. в странах Восточной Европы фиксируется противоположная тенденция – интенсивный ввод в сельскохозяйственный оборот ранее заброшенных пахотных угодий при существенных различиях движущих сил этого процесса (Estel et al., 2015). Эти процессы отмечаются и во многих регионах Европейской части России, где основная роль в возвращении в аграрный оборот пашен, заброшенных в 1990–2000-е гг., принадлежит крупным агрохолдингам (deBeurs et al., 2017). Однако, на большей части регионов Центрального Нечерноземья неиспользуемые сельскохозяйственные земли по-прежнему занимают значительные площади, а выведение новых земель из оборота лишь

локально компенсируется расширением пашни. Макрорегиональные пространственные закономерности соотношения заброшенных и используемых в настоящее время сельскохозяйственных земель в Центральном Нечерноземье четко фиксируются по мультивременным данным дистанционного зондирования среднего разрешения. Представленная на рис. 1 картосхема, составленная по данным Lesiv et al., 2018, отражает пространственные закономерности изменений в структуре пахотных земель регионов Центрального Нечерноземья.

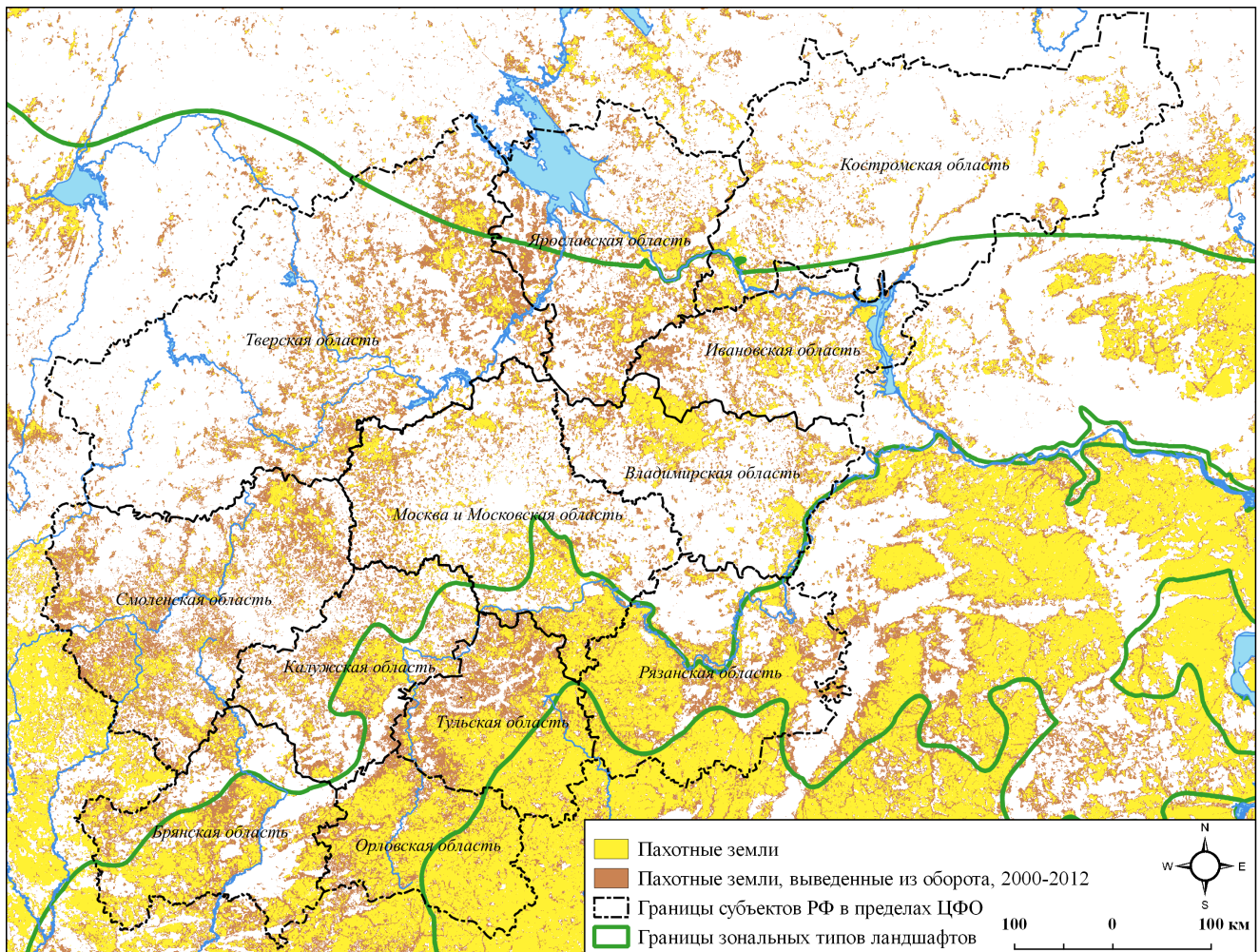


Рисунок 1. Распределение пахотных земель и земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота, по регионам Центрального Нечерноземья. Составлено по данным (Lesiv et al., 2018)

Наиболее масштабное зарастание древесно-кустарниковой растительностью в течение 2000-х гг. отмечается в северной части региона в пределах ландшафтной зоны смешанных хвойно-широколиственных лесов на территории Смоленской, Тверской, Костромской, Ярославской и Ивановской областей (рис. 1). Процесс зарастания практически не выражен на крайнем юге региона в пределах лесостепной зоны (южные части Орловской, Тульской, Рязанской областей). В то же время для ряда областей Нечерноземного центра (Московской, Калужской, Тульской и Орловской областей), характерно наиболее контрастное

распределение доли зарастающих сельскохозяйственных земель, в основном приуроченных к территориям этих субъектов, расположенных в пределах ландшафтной зоны широколиственных лесов. В последние 15 лет здесь отмечаются разнонаправленные изменения в структуре использования земель, представленные как зарастанием старых залежей древесно-кустарниковой растительностью, так и их повторной распашкой.

Многочисленные современные исследования в области дистанционной индикации и мониторинга выведенных из оборота сельскохозяйственных земель основаны на применении временных серий данных дистанционного зондирования (ДДЗ) низкого и среднего разрешения и сфокусированы на анализе закономерностей пространственно-временной дифференциации изменений структуры сельскохозяйственного использования земель, определения времени вывода из оборота и характера зарастания залежных земель на макрорегиональном и региональном уровнях (Alcantara et al., 2013; Estel et al., 2017; Королева и др., 2018; Lesiv et al., 2018).

Цель данной работы – оценка скорости расселения древесно-кустарниковой растительности по залежам в пределах ландшафтной зоны широколиственных лесов и выявление пространственной гетерогенности этого процесса на локальном уровне на основе комплексного использования разновременных данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения от космических и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта для изучения пространственно-временных особенностей протекания постагрогенной сукцессии по разновременным данным дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения нами выбран участок пашни в Дубенском районе Тульской области, выведенный из оборота в начале 2000-х гг. (рис. 2). Залежь расположена на выровненной водораздельной поверхности и пологих приводораздельных склонах, с севера и юга к ней примыкают небольшие массивы полидоминантных широколиственных лесов. Площадь участка – около 1.5 га. Отсутствие антропогенных нарушений, в частности, выпаса и сенокошения, с момента прекращения распашки привело к формированию на залежи березняка травяного. Данные сообщества характеризуют промежуточную стадию постагрогенной сукцессии, типичной для зоны широколиственных лесов (Люри и др., 2010). В древесном покрове доминируют березы бородавчатая (*Betula pendula*) и пушистая (*B. pubescens*), сформировавшие на большей части залежи плотный сомкнутый древостой с разреженным и обедненным по составу напочвенным покровом.

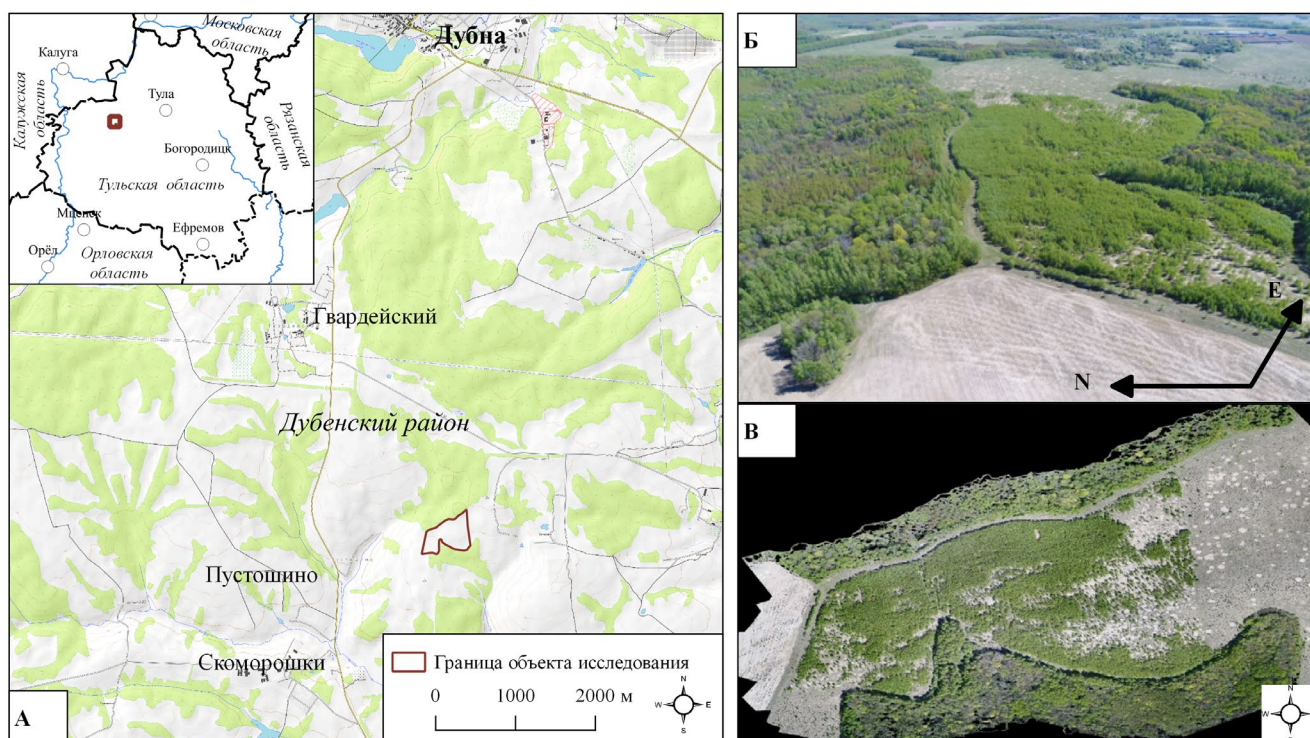


Рисунок 2. Схема расположения объекта исследования (А), перспективный снимок с БПЛА (Б) и ортофотоплан (В)

На исследуемый участок были отобраны все имеющиеся в архивах разновременные космические снимки очень высокого и сверхвысокого разрешения: OrbView-3, Geoeye-1, Quickbird, WorldView-2, формирующие прерывистую временную серию за 2004–2015 гг. (табл. 1). Для устранения пробелов в хронологии развития процесса зарастания на залежи с 2013 по 2018 гг. ежегодно проводилась разносезонная съемка различными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) на высоте 100 м.

Таблица 1. Основные характеристики архивных космических снимков

| Тип снимка | Дата съемки | Пространственное разрешение, м |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------------|
| OrbView-3, панхроматический | 29.07.2004 | 1 |
| Quickbird, RGB и панхроматический | 13.08.2007 | 0.6 |
| WorldView-2, RGB и панхроматический | 21.05.2010 | 0.5 |
| GeoEye-1, RGB и панхроматический | 23.07. 2015 | 0.5 |

Для извлечения количественных параметров формирующейся на залежи древесно-кустарниковой растительности и их ежегодных изменений в период 2013-2018 гг. использовались полученные на основе данных съемки с БПЛА трехмерные модели – фотограмметрические плотные облака точек, достаточные для извлечения количественных

параметров древесной растительности на небольших по площади участках, сопоставимые по точности с материалами воздушного лазерного сканирования (Dandois, Ellis, 2013). После удаления шумов и классификации единого облака точек с выделением класса «уровень земной поверхности» на их основе строятся сверхвысокодетальные цифровые модели местности и рельефа. Арифметическая разность между цифровыми моделями местности и рельефа может быть интерпретирована как цифровая модель высот древесного полога, используемая для количественной оценки и трехмерного моделирования структурных параметров древесно-кустарниковой растительности и их изменений во времени (Lisein et al., 2013). Для решения проблемы выделения древесного полога в условиях плотного сомкнутого древостоя, где по материалам летней съемки с БПЛА не удастся получить достаточное количество точек, описывающих уровень земной поверхности, были дополнительно привлечены материалы аэросъемки, проведенной в период покоя древесной растительности поздней осенью и зимой. Это позволило построить высокодетальную цифровую модель рельефа исследуемого участка и разновременные цифровые модели высот древесного полога с пространственным разрешением 6 см и вертикальной точностью до 5 см. (табл. 2).

Таблица 2. Основные характеристики аэросъемок с БПЛА и производных материалов

| | |
|--|---|
| Используемые БПЛА и камеры | DJ Inspire, DJI Phantom 3, DJI Phantom 4 Pro RGB камеры 16-20 МП |
| Высотные эшелоны съемки | 100 м |
| Угол съемки | В надир и перспективная съемка |
| Перекрытие снимков | Св. 80% |
| Пространственное разрешение одиночных снимков | 1–2 см |
| Средняя плотность облака точек | Св. 300 точек на м ² |
| Пространственное разрешение ЦММ | 6 см |
| Вертикальное разрешение ЦММ | 5 см |
| Пространственное разрешение ортофотомозаик | 3–4 см |

Количество деревьев и кустарников и их размещение в пределах залежи определялось отдельно для каждого временного среза, обеспеченного одиночными космическими снимками на основе визуального дешифрирования. Для данных с БПЛА, помимо визуального дешифрирования деревьев по разносезонным ортофотомозаикам, производилось автоматическое выделение пиков крон деревьев и кустарников по цифровой модели высот древесного полога с использованием метода локальных максимумов поверхности (Mongus,

Žalik, 2015). Охват крон, необходимый для определения проективного покрытия полога (сомкнутости крон), рассчитывался на основе объектно-ориентированного алгоритма сегментации модели высот древесного полога методом водоразделов (Ke, Quakenbush, 2011). Точность автоматического распознавания пиков крон была оценена по результатам синхронного времени съемки подреберного учета и визуального дешифрирования отдельных деревьев, и составила, в зависимости от густоты древесного полога, 70–90 %.

В результате визуального и автоматизированного дешифрирования высокодетальных ДДЗ были получены пространственные распределения следующих основных структурных параметров формирующейся на залежи древесной растительности на разные временные срезы: плотности древостоя, высоты древесного полога и сомкнутости крон. Привлечение разновременных материалов съемок с БПЛА обеспечило получение пространственно распределенных данных о вертикальном приросте древесного полога в пределах залежи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ комплексной временной серии ДДЗ с космических и беспилотных летательных аппаратов позволил детально реконструировать хронологию зарастания залежи древесно-кустарниковой растительностью и выявить отдельные стадии этого процесса. Основным индикатором пространственно-временной неоднородности протекания постагрогенной сукцессии за период дистанционного мониторинга является динамика плотности деревьев и кустарников на залежи.

Имеющаяся прерывистая временная серия космических снимков позволяет датировать время выведения залежи из оборота не ранее 2005 г. Первоначально возобновление древесной растительности происходило от стены леса, где уже к 2007 г. сформировалось несколько крупных кластеров с очень высокой плотностью березового подроста. В целом с 2004 г. выделяется два периода наиболее активного расселения древесно-кустарниковой растительности по залежи: 2007–2009 и 2013–2017 гг. Для более позднего периода характерно наиболее активное возобновление древесной растительности в центральной части залежи, удаленной от примыкающих лесных массивов, а также по западной и восточной периферии участка, граничащих с дорогой и эксплуатируемыми лугами (рис. 3).

Визуализация пространственного распределения выявленных структурных параметров формирующегося на залежи древостоя позволяет выделить несколько закономерностей характера постагрогенного возобновления древесной растительности в зависимости от их расположения по отношению к соседним лесным массивам (рис. 4).

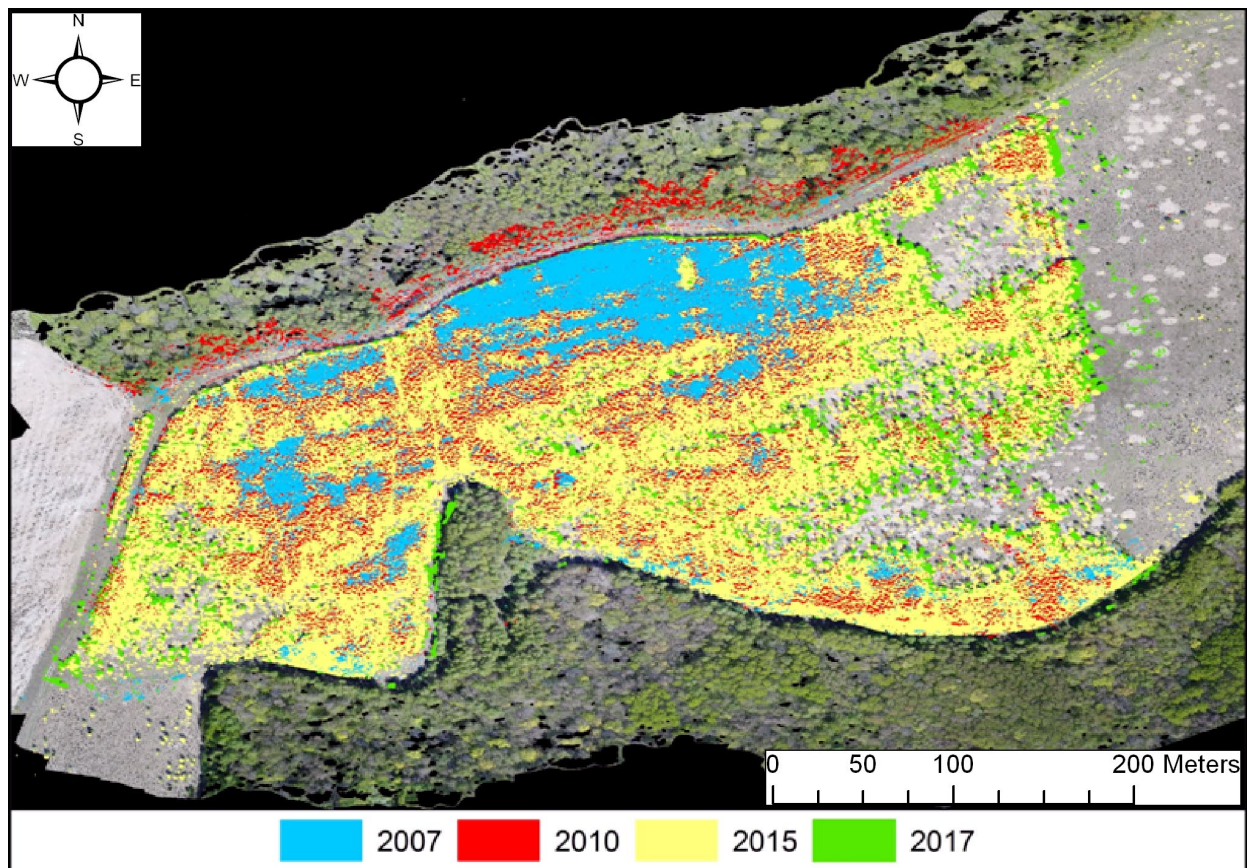


Рисунок 3. Динамика зарастания залежи древесной растительностью. Составлено по результатам визуального дешифрирования космических снимков и материалов с БПЛА

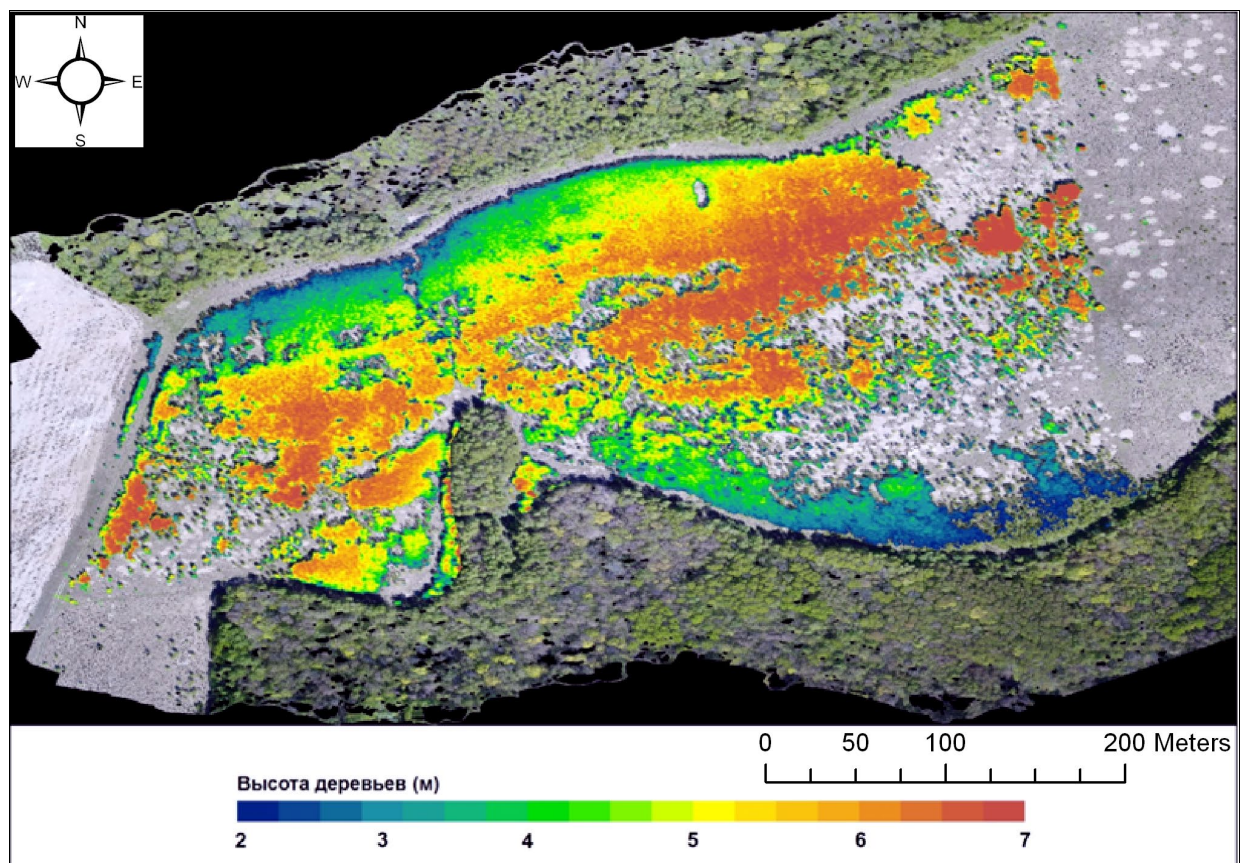


Рисунок 4. Высота древесного полога, сформировавшегося на залежи к 2018 г. Построено по материалам разносезонной съемки с БПЛА

Участки залежи, примыкающие к лесным массивам, в первые годы после прекращения сельскохозяйственного использования (2004–2009 гг.) отличались очень быстрым и интенсивным возобновлением древесной растительности, но сформировавшийся здесь полог на 2018 г. характеризуется минимальной высотой (3–4 м), максимальными для всей территории залежи плотностью стволов (до 7 стволов на м²) и сомкнутостью крон, прекращением или существенным замедлением вертикального прироста за 2013–2017 гг. В центральной части залежи возобновление древесной растительности началось только спустя 8–10 лет после прекращения распахивания, и имело, по всей видимости, очаговый характер. В 2015–2017 гг. здесь фиксируется резкое увеличение вертикального прироста древостоя до 30 см за период (рис. 5), максимальные в пределах всей залежи высоты сформировавшегося древесного полога (6–7 м) при меньшей плотности отдельных стволов и более низкой сомкнутости древостоя (рис. 6).

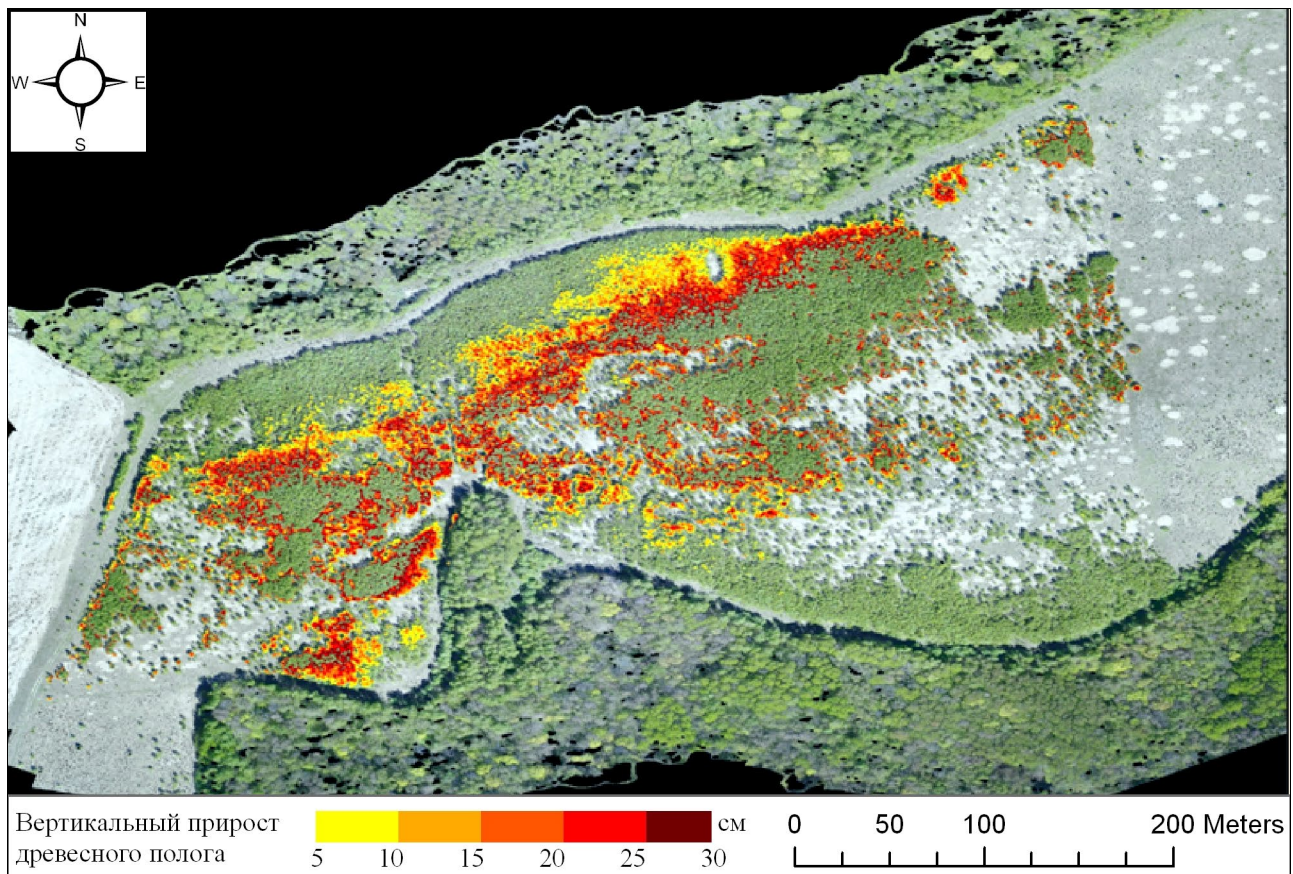


Рисунок 5. Вертикальный прирост древесного полога на залежи за 2015–2017 гг. Построено по материалам разновременной съемки с БПЛА

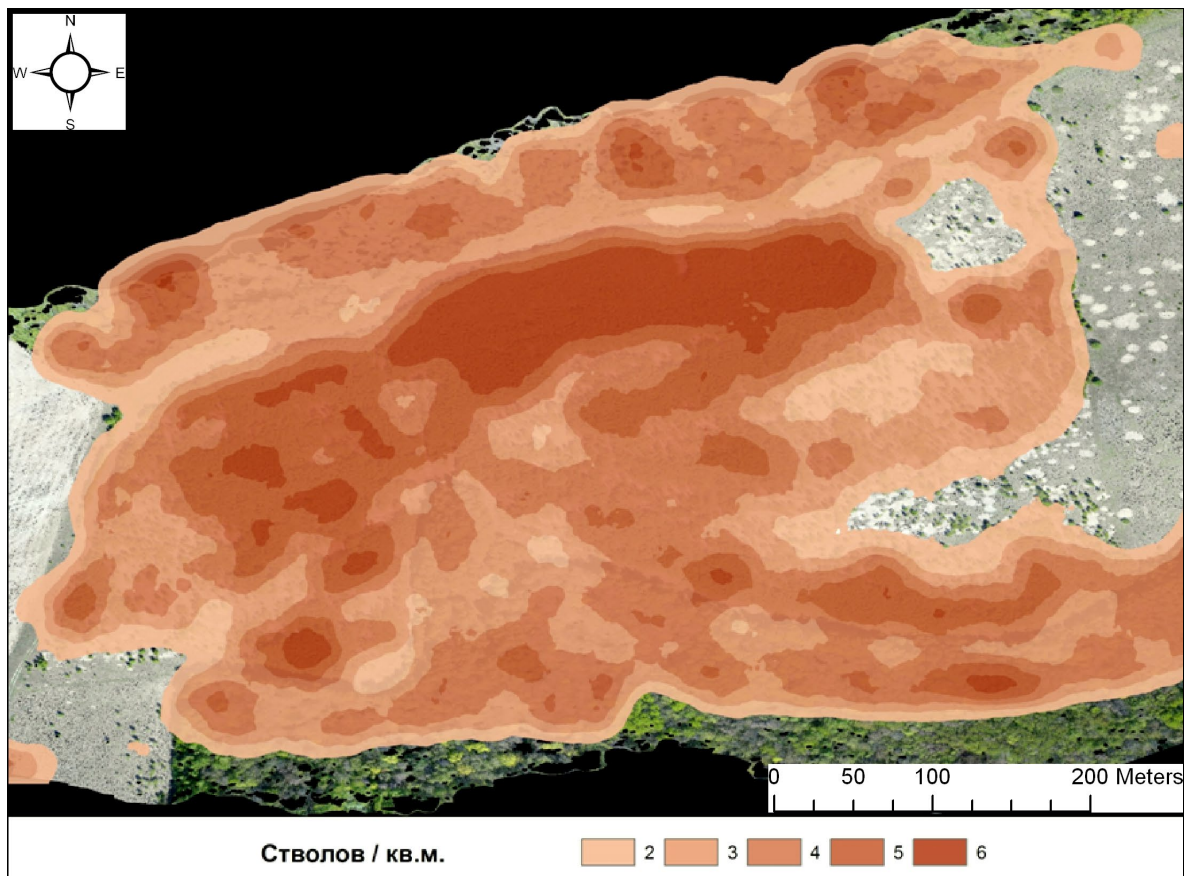


Рисунок 6. Плотность древостоя, сформировавшегося на залежи с момента прекращения сельскохозяйственного использования, 2005–2017 гг. Построено по материалам разновременной съемки с БПЛА

Стоит отметить сохранность четких границ залежи за весь период мониторинга, маркированных на западе грунтовой дорогой, а с востока – участком лугов, пастбищное использование которых препятствует появлению здесь древесной растительности. Прилегающие к этим границам периферийные участки залежи отличаются меньшей плотностью древостоя и сомкнутостью крон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексирование космических снимков сверхвысокого разрешения с материалами разновременной оптической сверхвысокодетаальной съемки с БПЛА позволило провести оценку структурных параметров формирующейся на залежи древесно-кустарниковой растительности и их изменений во времени, выявить и картографировать пространственную дифференциацию скорости и протекания постагрогенной сукцессии на неиспользуемой с 2005 г. залежи. Показана применимость разновременных данных оптической аэросъемки с БПЛА на сверхмалых высотах для выделения и количественного морфометрического анализа цифровых моделей высот древесного полога. Установлено, что в целом с момента вывода участка из сельскохозяйственного оборота за период 2005–2018 гг. практически на всей территории залежи сформировался сомкнутый монодоминантный древесный покров.

При этом постагрогенное возобновление древесной растительности отличалось значительной пространственной неоднородностью, четко проявлявшейся на локальном уровне, и протекало с различной скоростью и интенсивностью зарастания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполняется по теме госзадания Института географии РАН «Геоинформационно-картографический анализ и дистанционный мониторинг взаимодействия природы и общества» № АААА-А19-119022190168-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Королева Н.В., Тихонова Е.В., Еришов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Н.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83-96.

Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Неведова Т.А. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 426 с.

Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F. et al. Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data // Environmental Research Letters. 2013. Vol. 8. No. 3. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035035> (July 23, 2018).

Dandois J.P., Ellis E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 136. P. 259-276.

de Beurs K., Ioffe G., Nefedova T., Henebry G. Land Change in European Russia: 1982–2011 // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991. Springer, Cham, 2017. P. 223-241.

de Beurs K.M., Ioffe G. Use of Landsat and MODIS data to remotely estimate Russia's sown area // Journal of Land Use Science. 2014. Vol. 9. No. 4. P. 377-401.

Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 163. P. 312-325.

Ke Y., Quackenbush L.J. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. P. 4725-4747.

Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcantara C., Concepcion P.C. et al. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // *Scientific Data*/ 2018. No. 5. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.

Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonne, S., Lejeune, P. A. Photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from Small Unmanned Aerial System Imagery // *Forests*. 2013. Vol. 4. No. 4. P. 922-944.

Mongus D., Žalik B. An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 108. P. 219-233.

REFERENCES

Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F. et al., Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data, *Environmental Research Letters*, 2013, Vol. 8, No. 3. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035035> (July 22, 2018).

Dandois J.P., Ellis E.C., High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 136, pp. 259-276.

de Beurs K., Ioffe G., Nefedova T., Henebry G., Land Change in European Russia: 1982–2011, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Springer, Cham, 2017, pp. 223-241.

de Beurs K.M., Ioffe G., Use of Landsat and MODIS data to remotely estimate Russia's sown area, *Journal of Land Use Science*, 2014, Vol. 9, No. 4, pp. 377-401.

Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P., Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 163, pp. 312-325.

Ke Y., Quackenbush L.J., A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, pp. 4725-4747.

Koroleva N.V., Tihonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriljuk N.A., Pugachevskij A.V., Ocenka masshtabov zarastaniya nelesnykh zemel' v nacional'nom parke «Smolenskoe Poozer'e» za 25 let po sputnikovym dannym Landsat (Scales of overgrowth on non-forested lands of Smolenskoe Poozer'e national park: an assessment for the 25 years on remote sensing Landsat data) // *Lesovedenie*, 2018. No. 2. pp. 83-96.

Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Drauer M., Prishchepov A., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcantara C., Concepcion P.C. et al., Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries, *Scientific Data*, 2018, No. 5. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.

Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonne, S., Lejeune, P.A., Photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from Small Unmanned Aerial System Imagery // *Forests*, 2013, Vol. 4, No. 4, pp. 922-944.

Ljuri D.I., Gorjachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.A., *Dinamika sel'skhozjajstvennyh zemel' Rossii v HH veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (Dynamics of Agricultural lands of Russia in XX century and Postagrogenic Restoration of vegetation and soils) M.: GEOS, 2010, 426 p.

Mongus D., Zalik B., An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 108, pp. 219-233.

HIGHLY DETAILED REMOTE SENSING MONITORING OF TREE OVERGROWTH ON ABANDONED AGRICULTURAL LANDS

A.A. Medvedev, N.O. Telnova*, A.V. Kudikov

Institute of Geography RAS

Staromonetny per., 29, Moscow, 119017, Russia

*E-mail: natalia.telnova@gmail.com

Received 01 July 2019

The paper presents the results of long-term remote monitoring for the tree overgrowth on the abandoned agricultural land. This monitoring is based on satellite images with very high spatial resolution and ultra-detailed optical survey from Unmanned Air Vehicles. We have demonstrated successful use of photogrammetric dense point clouds for three-dimensional reconstruction of tree canopy structure on fallows by means of tree canopy height model extraction. We have got spatial data on post-agrogenic tree expansion on the fallow in 2005–2018, tree canopy heights and its vertical growth, stem density and tree cover projection. Distinct spatio-temporal heterogeneity of tree overgrowth has been revealed on the fallow in study. At the first stage after land abandonment the most rapid rehabilitation of trees was remarkable along the «walls» of adjacent forests where the densest but the lowest tree cover established now. During the later period tree overgrowth is connected with isolated hotspots and is characterized with the most intensive vertical growth of tree canopy.

Key words: *Central Non-Chernozem region, fallows, post-agrogenic succession, UAVs, digital canopy height models.*

Рецензент: к.б.н., н.с. Медведева М.А.