

Идентификация случаев возникновения смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли

А.Н. Шихов, А.В. Тарасов

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: and3131@inbox.ru*

В статье предложена методика идентификации и картографирования случаев смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли со спутников LANDSAT и карте изменений лесного покрова Земли (Global Forest Change Map). Методика основана на выявлении узких и протяженных сплошных ветровалов с последующей их верификацией по снимкам высокого разрешения, полученным с открытых картографических сервисов. Для определения даты прохождения смерча (появления ветровала) использованы все доступные данные со спутников LANDSAT и Terra/Aqua MODIS, а также данные реанализа по модели CFS. Предлагаемый подход позволяет получить объективную (независимую от плотности населения и наблюдательной сети) оценку пространственно-временного распределения случаев смерчей в лесной зоне, выявить области их повышенной повторяемости, определить некоторые характеристики смерчей (протяженность пути, средняя и максимальная ширина воронки, направление вращения).

Проведено сопоставление геометрических характеристик смерчевых ветровалов, выявленных по Global Forest Change и оцифрованных вручную по снимкам сверхвысокого разрешения. Полученный высокий уровень согласованности результатов доказывает релевантность использования данных Global Forest Change для идентификации смерчевых ветровалов и низкую вероятность пропуска объектов.

Предлагаемая методика была реализована для идентификации смерчевых ветровалов в восточной части Европейской территории России. Всего на данной территории выявлено 35 случаев ветровалов, вызванных прохождением смерчей и произошедших в период с 2003 г. по 2014 г. Наибольшая частота возникновения смерчей наблюдается на севере Пермского края и Кировской области, а также в южных и восточных районах Республики Коми.

Ключевые слова: смерчи, ветровалы, данные дистанционного зондирования Земли, снимки LANDSAT, Global Forest Change Map

*Одобрена к печати: 18.04.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-84-94*

Введение

На фоне происходящих изменений глобального и регионального климата высказываются предположения о возможном росте повторяемости опасных явлений погоды, в том числе и конвективных явлений (смерчей, сильных шквалов, крупного града) на территории России (Панфутова, 2008). Изучение современной климатологии опасных метеорологических явлений в связи с этим остается весьма актуальной задачей.

Особый интерес вызывает возможность увеличения частоты возникновения такого редкого и разрушительного явления, как воздушные смерчи (торнадо). По причине своего локального характера смерчи крайне редко фиксируются наблюдательной сетью. В настоящее время информация о факте прохождения смерча чаще всего поступает от непосредственных очевидцев явления, а также на основе анализа нанесенного ущерба. Репрезентативных оценок повторяемости смерчей на территории России не существует, поскольку частота наблюдения смерчей напрямую зависит от плотности населения. Систематизация сведений о случаях смерчей в Европе и России ведется в рамках Европейской базы данных об опасных явлениях погоды (ESWD), разрабатываемой ESSL (European severe storms laboratory). Однако для территории России данные, заносямые в ESWD, являются неполными и не проходят достаточной проверки.

Первая систематизация сведений о случаях смерчей на территории бывшего СССР была выполнена А.И. Снитковским в 1987 г. (Снитковский, 1987). Им были проанализированы данные о 248 случаях смерчей (начиная с XIX века) и определена вероятность появления смерча в расчете на 1000 км² территории. К областям повышенной повторяемости смерчей А.И. Снитковский отнес Беларусь и Прибалтику. В то же время, наибольшая вероятность возникновения сильных смерчей (3–4 категорий интенсивности), по многолетним данным, характерна для Центрального района. База данных, созданная А.И. Снитковским, была дополнена при разработке рекомендаций по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии (Рекомендации..., 2001). В данном документе приведен каталог случаев смерчей на территории России за период 1987-2001 гг. (всего 103 случая), по материалам Гидрометцентра России. На основе обобщения материалов многолетних наблюдений было проведено зонирование территории бывшего СССР по вероятности возникновения смерча и создана карта-схема районирования в масштабе 1:50 000 000 (Брюхань, Ляхов, Погребняк, 1989). Однако работы по ее уточнению с учетом актуальных данных не проводились. Большинство публикаций по данной тематике посвящены более или менее детальному анализу условий возникновения конкретных случаев смерчей в России (Васильев и др., 1985; Finch, Vikos, 2012; Kurgansky et al., 2013; Chernokulsky et al., 2015; Шихов, Быков, 2015). Наиболее детально изучен случай возникновения нескольких разрушительных смерчей 9 июня 1984 г.

Одним из видов ущерба от смерчей являются ветровалы в лесных массивах. В регионах с высокой лесистостью и низкой плотностью населения (таких как север Европейской части России и Урала) данные о ветровальных нарушениях лесного покрова являются единственным доступным источником получения информации о случаях смерчей. По данным о ветровалах может быть определена траектория смерча, ширина воронки, направление вращения, сделаны предположения об интенсивности смерча. Основными преимуществами такого подхода являются объективность и независимость получаемых оценок от плотности населения. Смерчевые ветровалы в большинстве случаев имеют явные отличительные признаки, позволяющие отделить их от ветровалов, вызванных шквалами (Петухов, Немчинова, 2014; Peterson, 2000).

В настоящее время мониторинг и ретроспективный анализ ветровальных нарушений на обширных территориях реализуется на основе временных рядов снимков со спутников серии LANDSAT. Этому способствует их оптимальное пространственное, спектральное и временное разрешение, а также бесплатный доступ к данным. В России снимки LANDSAT применяются для мониторинга ветровалов как на уровне отдельных субъектов РФ (Петухов, Немчинова, 2014; Шихов, 2014), так и для всей территории страны (Крылов, Малахова, Владимирова, 2012; Уваров, 2012). Однако задача выделения ветровалов, вызванных именно смерчами, ранее не ставилась.

В Северной Америке смерчи ежегодно уничтожают тысячи гектаров леса, по этой причине изучение вызванных ими нарушений лесного покрова весьма актуально (Peterson, 2000). Национальная служба погоды США (National weather service) ведет системати-

ческий сбор данных обо всех случаях смерчей и документирование нанесенного ими ущерба, в том числе и ущерба для лесного хозяйства. Это позволяет получить объективные оценки повторяемости смерчей.

Данные спутниковой съемки LANDSAT используются для изучения последствий прохождения смерчей еще с 80-х гг. XX в. (Dyer, 1988). С середины 2000-х гг. для оперативного определения траекторий и уточнения характеристик смерчей (протяженности пути и ширины воронки смерча) в США используются также снимки низкого разрешения MODIS (Jedlovec et al., 2006). Ряд работ посвящен сопоставлению траектории прохождения смерча, определенной по космическим снимкам, с имеющимися данными об интенсивности смерча по шкале Фуджита (Myint et al., 2008; Yuan et al., 2002).

Важную информацию для определения характеристик смерча (в частности, направление его вращения и характер распределения скорости ветра у поверхности земли) можно получить на основе анализа высокдетальных снимков ветровальных участков (в том числе аэрофотосъемки). С их применением производится верификация моделей пространственного распределения скорости ветра в зоне смерча (Beck, Dotzek, 2010).

Таким образом, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляют ценный информационный ресурс для изучения случаев смерчей в лесной зоне. Для территории России это особенно актуально в связи с низкой плотностью населения и отсутствием систематизированной информации о частоте возникновения смерчей.

В настоящей статье рассматривается методика ретроспективного анализа случаев возникновения смерчей в лесной зоне на основе анализа многолетних рядов данных ДЗЗ LANDSAT и Terra/Aqua MODIS, а также карты изменений лесного покрова Земли Global Forest Change Map (Hansen et al., 2013).

Исходные данные и методы исследования

Методика идентификации смерчевых ветровалов по многолетним рядам данных космической съемки

В настоящее время космический мониторинг ветровалов в России проводится, главным образом, на основе бесплатных данных со спутников серии LANDSAT. Наличие многолетнего ряда данных однородного разрешения позволяет изучать особенности пространственного распределения и другие характеристики ветровалов за 30-летний период. При выполнении анализа за период с 2001 г. по настоящее время существует также возможность использования готового тематического продукта *Global Forest Change Map* – карты изменений лесного покрова Земли в 2001-2014 гг. (Hansen et al., 2013). Проект *Global Forest Change* был реализован группой специалистов Мэрилендского университета. На основе анализа временного ряда снимков LANDSAT (всего было обработано 654 178 сцен) были получены данные о лесопокрытой площади по состоянию на 2000 и 2014 годы, участках нарушений лесного покрова (*forest loss*) и лесо-

восстановления (forest gain) в глобальном масштабе с пространственным разрешением 30 м.

Данные Global Forest Change находятся в свободном доступе в Интернете. Данные о нарушениях лесного покрова, классифицированные по годам (Forest Loss Year), предоставляются в виде целочисленных растров в формате GeoTIFF в разграфке $10^\circ \times 10^\circ$ по широте и долготе. В ряде случаев год появления нарушения определен неверно, что обусловлено влиянием облачности, а также тем, что в проекте использованы только сцены LANDSAT, полученные в течение вегетационного периода.

В проекте Global Forest Change не проводилось определение причин нарушений лесного покрова, поскольку автоматизация этого процесса представляет значительные сложности. Однако использование геометрических признаков и дополнительных данных (включая исходные снимки LANDSAT, а также архивные снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов) позволяет достаточно надежно выделить ветровалы, вызванные прохождением смерчей, среди других типов нарушений.

Для идентификации смерчевых ветровалов производилась конвертация исходного растра, содержащего данные о нарушениях лесного покрова (Forest Loss Year), в векторное представление данных с классификацией по годам. В полученных векторных наборах данных выполнялся поиск объектов, удовлетворяющих следующим критериям:

1. Характерные размеры полигона $L = 3...50$ км, $M = 50...1000$ м, длина превышает ширину более чем в 10 раз.
2. Сплошной характер повреждения древостоя (может быть определен по исходным снимкам LANDSAT, полученным с web-ресурса Геологической службы США).
3. Линейная структура полосы повреждения древостоя, отличающая смерчевые ветровалы от шкваловых, для которых характерна линейно-веерная структура и мозаичный характер повреждений.

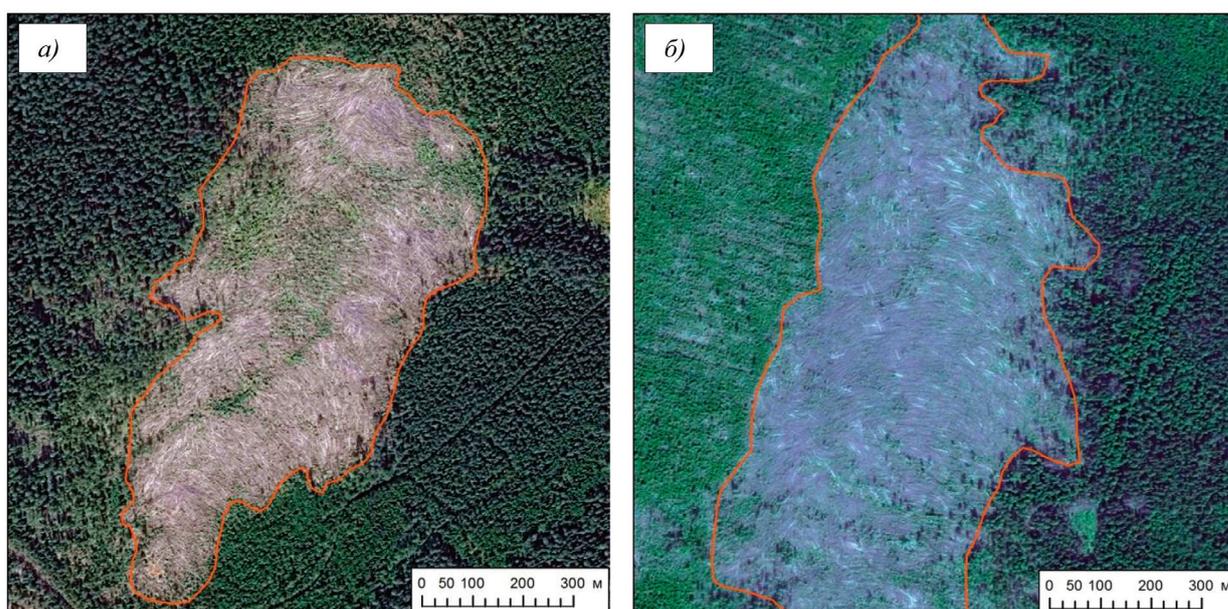


Рис. 1. Участки смерчевых ветровалов в Гайнском районе Пермского края: а) – ветровал от смерча 04.06.2005 г., б) – ветровал от смерча 07.06.2009 г.

4. Нелинейный (вихревой) характер повала деревьев (*рис. 1*). На ветровалах, вызванных шквалами, вектор вывала деревьев совпадает с направлением ветра при шквале. Характер повала деревьев и направление вращения смерча определялись по высокодетальным спутниковым снимкам, полученным с открытых картографических сервисов.

Участки ветровальных нарушений, удовлетворяющие всем перечисленным критериям, были классифицированы как смерчевые ветровалы.

Оценка погрешности определения геометрических характеристик смерчевых ветровалов по данным Global Forest Change Map

Для оценки точности определения контуров смерчевых ветровалов была использована методика, описанная в работе (Королева, Ершов, 2012). Она основана на сравнении геометрических характеристик ветровалов, определенных по данным Global Forest Change, с оцифрованными вручную по архивным снимкам сверхвысокого разрешения (фрагменты снимков получены с открытых картографических сервисов). На основе такой оценки можно делать выводы о пригодности продукта Global Forest Change для идентификации смерчевых ветровалов, а также о вероятности пропуска объектов.

Были рассмотрены 22 смерчевых ветровала на территории Пермского края и Республики Коми. Ни один из них не был пропущен по данным Global Forest Change и только в 4-х случаях выявлен частичный пропуск ветровала (т.е. протяженность ветровала по данным Global Forest Change занижена более чем на 10% в сравнении с фактическими данными). В целом сопоставление протяженности и площадей участков ветровалов, определенных по данным Global Forest Change и по высокодетальным снимкам, демонстрирует очень высокий уровень согласованности. Это подтверждается наличием тесной линейной связи между наборами данных и высоким значением коэффициента детерминации ($R^2=0,952$) (*рис. 2*).

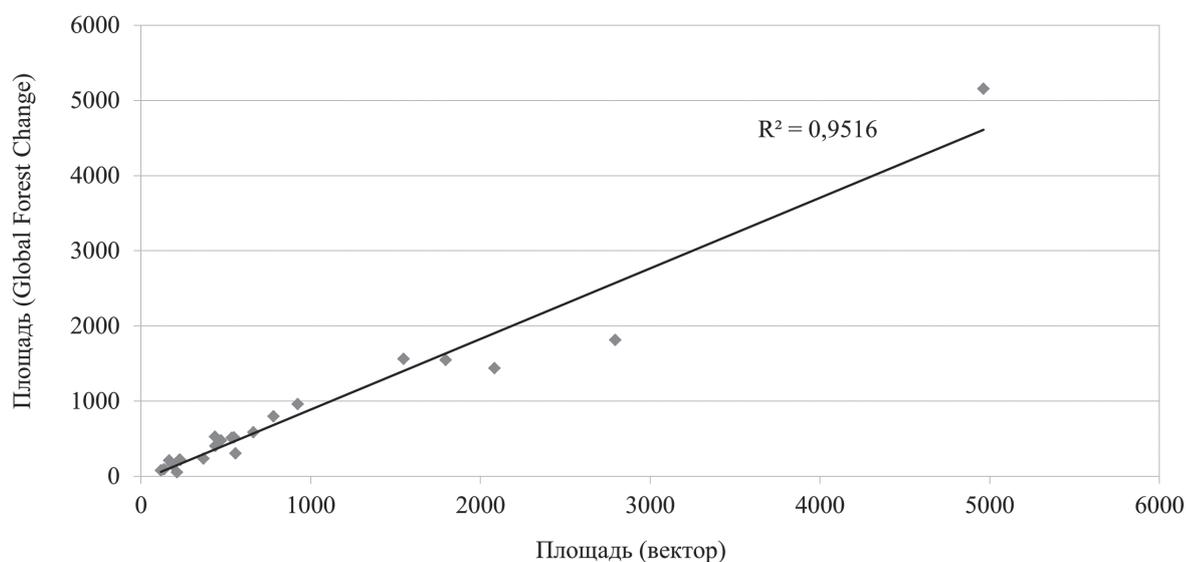


Рис. 2. Сравнение площадей смерчевых ветровалов, выделенных автоматически (Global Forest Change) и вручную по снимкам высокого разрешения

Подтверждается также известная закономерность увеличения относительной ошибки определения площади и протяженности для небольших ветровалов (в сравнении с крупными). Участки смерчевых ветровалов шириной менее 60–80 м часто не идентифицируются по данным Global Forest Change, что обусловлено предельными возможностями съемочной системы LANDSAT. Кроме того, на точность определения контуров ветровалов может влиять сбой Scan Line Corrector в данных LANDSAT-7 (которые использовались для создания продукта Global Forest Change за 2001–2012 гг. наряду с данными LANDSAT-5). В целом достаточно высокая точность определения геометрических характеристик ветровалов по данным Global Forest Change и отсутствие пропусков указывает на их пригодность для идентификации смерчевых ветровалов за период 2001–2015 гг.

Уточнение даты прохождения смерча необходимо для последующего анализа условий его возникновения. В проекте Global Forest Change даты нарушений лесного покрова определены с точностью до года, причем в ряде случаев имеются ошибки. Для более точного определения даты возникновения смерча, приведшего к ветровалу, использовались все доступные данные спутниковых наблюдений и реанализа (с учетом того, что смерчи в данном регионе могут возникать с середины мая до начала сентября).

На первом этапе для каждого смерчевого ветровала устанавливали диапазон дат его появления, используя все имеющиеся в наличии снимки со спутников LANDSAT. С учетом влияния облачности, это позволяло определить диапазон даты прохождения смерча с точностью 1–2 месяца, в ряде случаев – до одной недели.

В некоторых случаях отсутствие качественных снимков со спутников LANDSAT не позволяло установить дату ветровала даже с точностью до года. Для решения этой проблемы были использованы зимние безоблачные снимки Terra/Aqua MODIS с пространственным разрешением 250 м. Сопоставление зимних снимков двух сезонов позволяет выявить сплошные ветровалы шириной от 150–200 м (рис. 3).

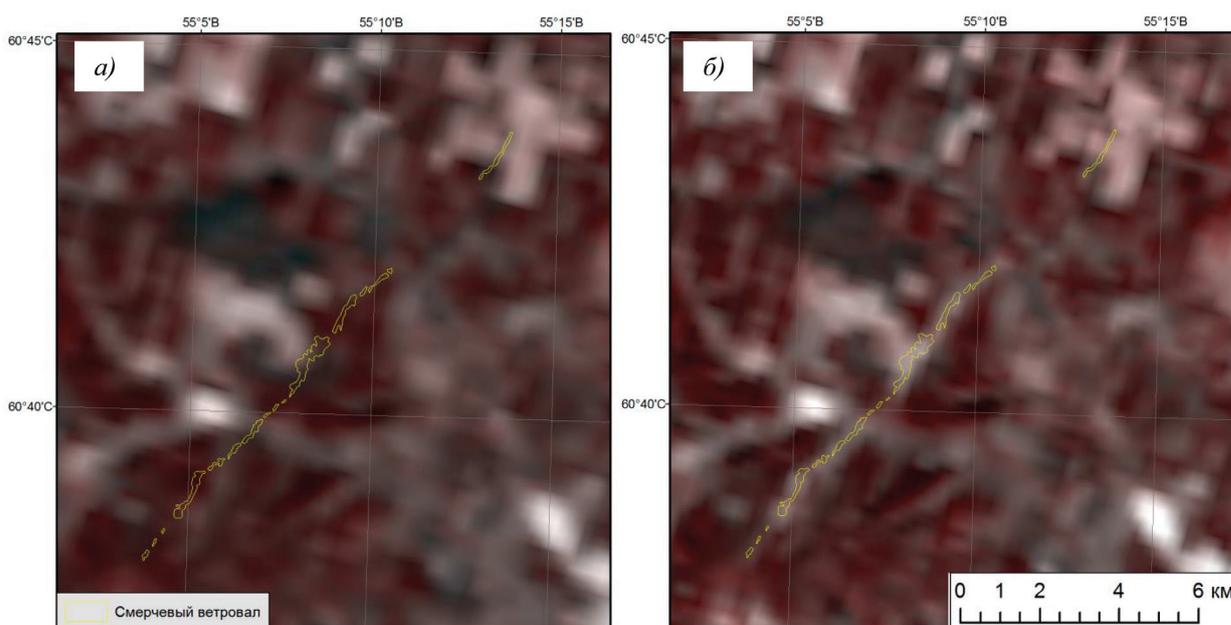


Рис. 3. Использование зимних снимков Terra MODIS для уточнения даты прохождения смерча: а) – снимок за 07.04.2006 г. б) – снимок за 30.03.2007 г.

В дальнейшем для уточнения даты прохождения смерча использовалась информация о направлении его движения, а также данные реанализа метеорологических полей. Синоптические условия возникновения смерчей в Европейской части России достаточно хорошо описаны в литературе (Васильев, Песков, Снитковский, 1984; Снитковский, 1987; Finch, Vikos, 2012). Для выявления случаев, когда наблюдались условия, способствующие возникновению смерчей, использовался реанализ модели CFS за период с 1979 г. Этот реанализ отличается высоким пространственным ($0,5^\circ$) и временным (6 ч) разрешением. Поскольку известно, что направление перемещения смерча в целом совпадает с направлением ветра в средней тропосфере, то существует возможность по данным реанализа выделить ситуации, при которых ведущий поток в средней тропосфере (и вероятное направление движения смерча) совпадает по направлению с вектором выявленного смерчевого ветровала. Таким способом были уточнены даты возникновения нескольких случаев смерчей в 2007 и 2009 годах.

Помимо данных реанализа, для уточнения даты возникновения смерчей анализировались наблюдения метеостанций, ближайших к месту обнаружения смерчевого ветровала, и сведения, опубликованные в СМИ. В ряде случаев это также позволило установить дату, когда наблюдался смерч.

Результаты и обсуждение

Методика идентификации смерчевых ветровалов была реализована для территории северо-восточной, наименее заселенной части Европейской России (Республики Коми, Удмуртии, Кировской области и Пермского края). Выбор территории исследования обусловлен как ее высокой лесистостью (более 70%), так и тем, что ранее уже было известно о нескольких случаях сильных смерчей, наблюдавшихся в этом регионе за последнее десятилетие (Шихов, 2014). Всего на территории данных субъектов РФ выявлено 35 смерчевых ветровалов, произошедших в период 2001-2014 гг. (рис. 4). В двух случаях значительная ширина ветровала (более 1000 м) не позволяет утверждать, что причиной ветровала был именно смерч, а не сильный шквал (но остальные признаки указывают на смерчевую природу ветровала).

На рис. 4 выделяются две зоны повышенной плотности смерчевых ветровалов: на севере Кировской области, юге Республики Коми и севере Пермского края, между 59° и 62° с.ш. (более 20 случаев), и на востоке Республики Коми вблизи Уральского хребта, между 62° и 64° с.ш. (7 случаев). Такое положение зон повышенной повторяемости смерчей может быть обусловлено следующими факторами:

- Данная область в летний период часто оказывается в теплых секторах циклонов, перемещающихся вдоль арктического побережья Европейской России, вследствие чего здесь складываются благоприятные условия для развития смерчей.
- Высокая лесистость территории способствует повышению влажности воздуха и более интенсивному развитию конвекции.

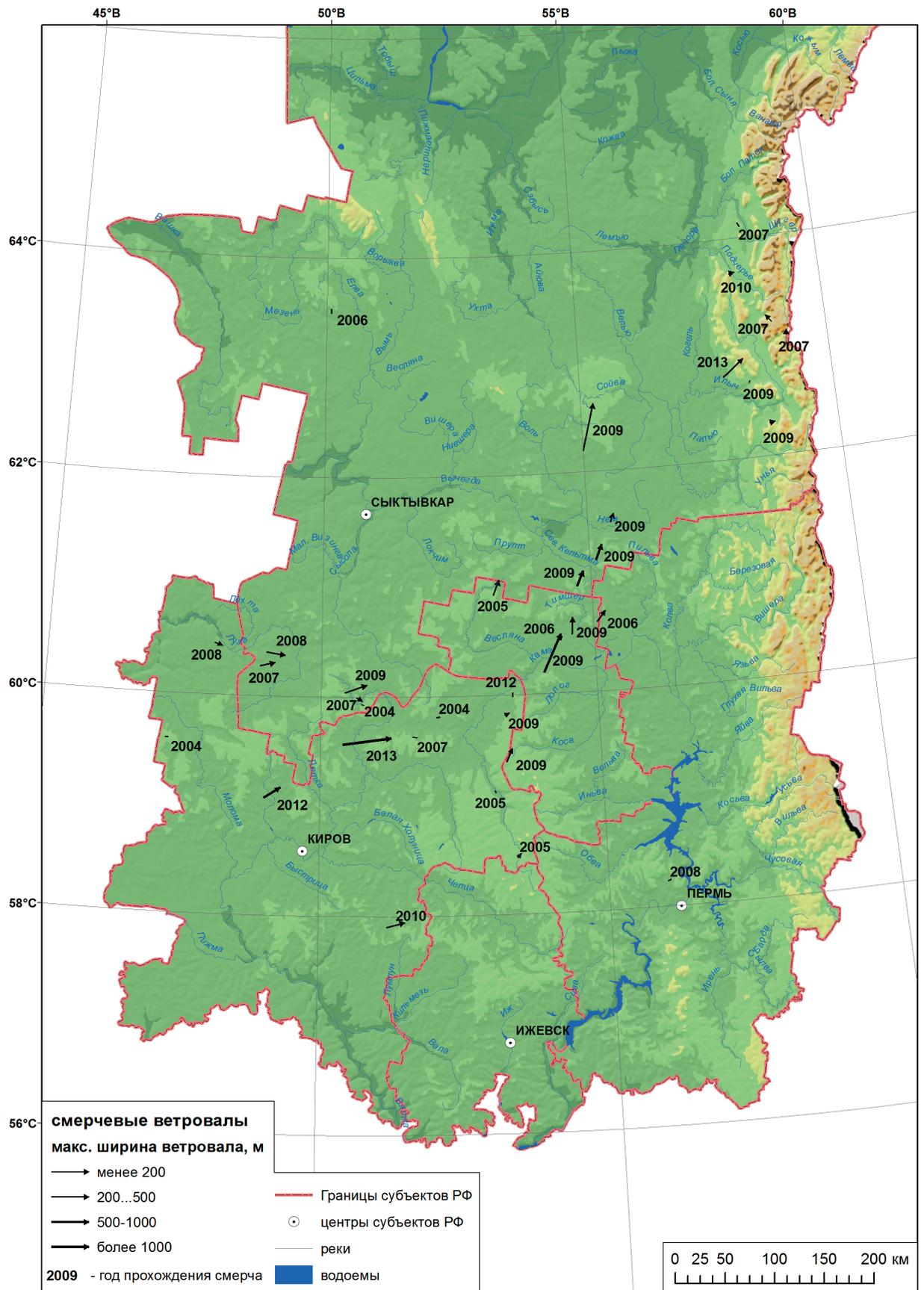


Рис. 4. Пространственное распределение смерчевых ветровалов в период 2001-2014 гг. на территории Республики Коми, Пермского края и Кировской области

- Возникновению смерчей вблизи Уральского хребта способствует известный эффект усиления конвекции над пересеченным рельефом.

Из 35 случаев смерчей 11 наблюдались в 2009 г., в том числе 6 – в течение одного дня, 7 июня 2009 г. Также более высокой частотой возникновения смерчей отличался июнь 2007 г. (6 случаев). В другие годы зафиксировано не более трех смерчей, а в 2001-2003 и 2011 годах – ни одного. 22 случая смерчей зафиксировано в июне, три случая в июле и пять – в августе, для пяти случаев дата с точностью до месяца не определена.

Большинство смерчевых ветровалов имеет протяженность 5-10 км и максимальную ширину 200–300 м (рис. 5). Максимальная протяженность смерчевых ветровалов достигает 50 км, а ширина – 600–900 м (такие характеристики имел смерч, наблюдавшийся 7 июня 2009 г. в Гайнском районе Пермского края). Категорию интенсивности смерча по характеру ветровала определить невозможно, поскольку практически все смерчевые ветровалы – сплошные.

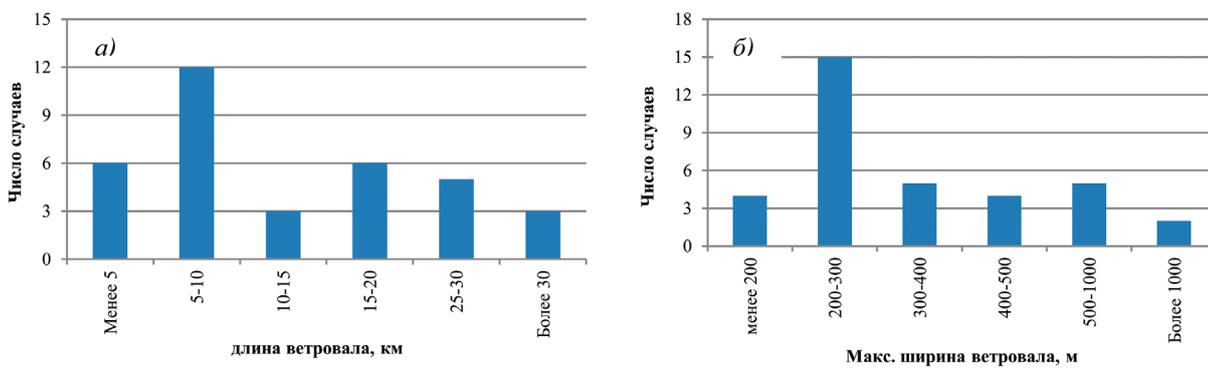


Рис. 5. Распределение смерчевых ветровалов по протяженности (а) и по максимальной ширине (б)

Заключение

Первые результаты идентификации смерчевых ветровалов в лесной зоне Европейской части России по данным Global Forest Change и многолетним рядам снимков LANDSAT показывают, что на их основе возможно получение объективной оценки пространственно-временного распределения случаев смерчей (в пределах лесной зоны). При сопоставлении геометрических характеристик ветровалов, выявленных по Global Forest Change и оцифрованных вручную по снимкам сверхвысокого разрешения, получен очень высокий уровень согласованности результатов. Следовательно, эти данные могут быть использованы для идентификации смерчевых ветровалов.

С применением предлагаемой методики планируется изучить пространственно-временное распределение смерчевых ветровалов в пределах всей лесной зоны Европейской части России и выполнить районирование изучаемой территории по повторяемости и возможной интенсивности смерчей. Кроме того, использование данных ДЗЗ позволит выявить приуроченность возникновения смерчей к элементам рельефа, ландшафтной структуры территории и типам землепользования.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00245-а, 15-35-20962 мол_a_вед).

Литература

1. Брюхань Ф.Ф., Ляхов М.Е., Погребняк В.Н. Смерчеопасные зоны в СССР и размещение атомных станций // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 1. С. 40–48.
2. Васильев А.А., Песков Б.Е., Снитковский А.И. Смерчи, шквалы и град 8–9 июня 1984 г. // Метеорология и гидрология. 1985. №8. С. 5–15.
3. Королева Н.В., Ершов Д.В. Оценка погрешности определения площадей ветровалов по космическим изображениям высокого пространственного разрешения LANDSAT-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. № 1. С. 80–86.
4. Крылов А.М., Малахова Е.Г., Владимирова Н.А. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки // Изв. Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2012. Вып. 200. С. 197–208.
5. Панфутова Ю.А. Опасные метеорологические явления на равнинной территории России и риски, создаваемые ими: автореф. дис. канд. геогр. наук. СПб. 2008. 21 с.
6. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // Лесоведение. 2014. № 6. С. 16–24.
7. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. РБ-022-01. М.: Госатомнадзор РФ, 2001. 29 с.
8. Снитковский А.И. Смерчи над территорией СССР // Метеорология и гидрология. 1987. №9. С. 12–25.
9. Уваров И.А., Ершов Д.В., Крылов А.М., Бартаев С.А., Лупян Е.А. Информационная система космического мониторинга санитарного состояния лесов ВЕГА-лесопатолог // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 171–182.
10. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–30.
11. Шихов А.Н., Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 124–133.
12. Beck V., Dotzek N. Reconstruction of near-surface tornado wind fields from forest damage // J. Appl. Meteor. Climatol. 2010. Vol. 49. P. 1517–1537.
13. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Zakharchenko D.I., Mokhov I.I. Genesis Environments and Characteristics of the Severe Tornado in the South Urals on August 29, 2014 // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40. P. 794–799.
14. Dyer R. C. Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988, Vol. 54. P. 1429–1435.
15. Finch J., Bikos D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // Electron. J. Severe Storms Meteor. 2012. Vol. 7(4). P. 1–28.
16. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina I.A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.
17. Jedlovec G.J., Nair U., Haines S.L. Detection of storm damage tracks with EOS data // Weather and Forecasting. 2006. Vol. 21. P. 249–267.
18. Kurgansky M.V., Chernokulsky A.V., Mokhov I.I. The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom? // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. Vol. 38. P. 539–546.
19. Myint S.W., Yuan M., Cerveny R.S., Giri C. Comparison of remote sensing image processing techniques to identify tornado damage areas from Landsat TM data // Sensors. 2008. Vol. 8. P. 1128–1156.
20. Peterson C.J. Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change // Science of the Total Environment. 2000. Vol. 262. P. 287–311.
21. Yuan M., Dickens-Micozzi M., Magsig M.A. Analysis of tornado damage tracks from the 3 May tornado outbreak using multispectral satellite imagery // Weather and Forecasting. 2002. Vol. 17. P. 382–398.

Identification of tornado cases in a forest region using long-term series of remote sensing data

A.N. Shikhov, A.V. Tarasov

Perm State National Research University, Perm 614990, Russia
E-mail: and3131@inbox.ru

The article describes a method of tornado track identification and mapping in forested regions using long-term series of LANDSAT data and LANDSAT-based Global Forest Change Map. The method is based on the identification of narrow and elongated areas of total forest windfall disturbances, with their subsequent verification by high-resolution satellite images, received from open map services. To determine the date of tornado occurrence (the appearance of windfall) we have used all available images from LANDSAT and Terra/Aqua MODIS sensors and CFS model reanalysis data. The proposed approach makes it possible to objectively (that is independent of the population density and observation network) estimate the spatial and temporal distribution of tornado cases in forested regions. It also

allows identifying areas of high frequency of tornado appearance, and estimating some tornado parameters (path length, the average and maximum width of tornado, and sense of rotation).

We compared the geometrical parameters of tornado tracks identified by Global Forest Change and digitized manually for high resolution satellite images. A very good agreement of the results proved the relevance of using Global Forest Change data for tornado tracks identification, and low probability of missing objects.

The proposed method of tornado tracks identification was implemented for the eastern part of the European Russia. In total, in this area we identified 35 tracks of tornadoes occurred in the period from 2003 to 2014. The highest tornadoes frequency is observed on the north of Perm and Kirov Regions, in the southern and eastern parts of Komi Republic.

Keywords: tornadoes, forest windfalls disturbances, remote sensing data, LANDSAT images, Global Forest Change Map

Accepted: 18.04.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-84-94

References

1. Bryukhan' F.F., Lyakhov M.E., Pogrebynyak V.N. Smercheopasnye zony v SSSR i razmeshchenie atomnykh stantsii (Tornado danger zones in the USSR and placement of nuclear power stations), *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geograficheskaya*, 1989, No. 1, pp. 40–48.
2. Vasil'ev A.A., Peskov B.E., Snitkovskii A.I. Smerchi, shkvaly i grad 8–9 iyunya 1984 g. (Tornadoes, squalls and hailstorms 8–9 June 1984), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1985, No. 8, pp. 5–15.
3. Koroleva N.V., Ershov D.V. Otsenka pogreshnosti opredeleniya ploshchadei vetrovalov po kosmicheskim izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya LANDSAT-TM (Estimation of error in determining the forest windfall disturbances area on high spatial resolution Space images of LANDSAT-TM), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 80–86.
4. Krylov A.M., Malakhova E.G., Vladimirova N.A. Vyyavlenie i otsenka ploshchadei katastroficheskikh vetrovalov 2009–2010 gg. po dannym kosmicheskoi s"emki (Identification and evaluation of catastrophic areas of forest windfall disturbance of 2009–2010 according to satellite imagery), *Izv. Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, Vol. 200, pp. 197–208.
5. Panfutova Yu.A. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya na ravninnoi territorii Rossii i riski, sozdavaemye imi: avtoref. dis. kand. geogr. nauk* (Dangerous meteorological phenomena on the flat territory of Russia, and they caused risks: synopsis of cand. geogr. sci. thesis), Sankt-Petersbourg, 2008, 21 p.
6. Petukhov I.N., Nemchinova A.V. Vetroval'nye narusheniya lesnogo pokrova v Kostromskoi oblasti i na sopredel'nykh territoriyakh v 1984–2011 gg. (Forest windfall disturbances in the Kostroma region and adjacent territories in the 1984–2011), *Lesovedenie*, 2014, No. 6, pp. 16–24.
7. *RB-022-01* (Russian standard), Moscow: Gosatomnadzor, 2001, 29 p.
8. Snitkovskii A.I. Smerchi nad territoriei SSSR (Tornadoes over Soviet Union territory), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1987, No. 9, pp. 12–25.
9. Uvarov I.A., Ershov D.V., Krylov A.M., Bartalev S.A., Loupian E.A. Informatsionnaya sistema kosmicheskogo monitoringa sanitarnogo sostoyaniya lesov VEGA-lesopatolog (Information system of space monitoring forest health VEGA lesopatolog), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 171–182.
10. Shikhov A.N. Otsenka posledstviy stikhiinykh prirodnykh yavlenii dlya lesnykh resursov Permskogo kraya po mnogoletnim ryadam dannyykh kosmicheskoi s"emki (Estimation of forest damage from natural disasters in Perm region using the long-term series of space imagery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 21–30.
11. Shikhov A.N., Bykov A.V. Izuchenie dvukh sluchaev sil'nykh smerchei v Predural'e (The study of two cases of severe tornadoes in the Predural'e region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 124–133.
12. Beck V., Dotzek N. Reconstruction of near-surface tornado wind fields from forest damage, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2010, Vol. 49, pp. 1517–1537.
13. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Zakharchenko D.I., Mokhov I.I., Genesis Environments and Characteristics of the Severe Tornado in the South Urals on August 29, 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, Vol. 40, pp. 794–799.
14. Dyer R.C., Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, Vol. 54, pp. 1429–1435.
15. Finch J., Bikos D., Russian tornado outbreak of 9 June 1984, *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 2012, Vol. 7(4), pp. 1–28.
16. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina I.A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.
17. Jedlovec. G.J., Nair U., Haines S.L., Detection of storm damage tracks with EOS data, *Weather and Forecasting*, 2006, Vol. 21, pp. 249–267.
18. Kurgansky M.V., Chernokulsky A.V., Mokhov I.I., The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom? *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, pp. 539–546.
19. Myint S.W., Yuan M., Cervený R.S., Giri C., Comparison of remote sensing image processing techniques to identify tornado damage areas from Landsat TM data, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 1128–1156.
20. Peterson C.J., Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change, *Science of the Total Environment*, 2000, Vol. 262, pp. 287–311.