

Динамика почвенного увлажнения весной и летом 2010 г. на европейской территории России на основе анализа данных дистанционного зондирования

Е.А. Черенкова, В.В. Попова

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: lcherenkova@marketresearch.ru*

Рассмотрена динамика аномалий влажности почвы вне сезона вегетации 2009–2010 гг. и в весенне-летний период 2010 г. по спутниковым данным. Установлено, что в результате сочетания аномалий метеорологических параметров на протяжении осени – весны 2009–2010 гг. в начале лета в центре европейской территории России возник дефицит почвенного увлажнения. Формирование засушливых условий стало результатом влияния ряда факторов, в числе которых теплая и сухая осень, холодная зима (не способствующая пополнению запасов почвенной влаги за счет снеготаяния), а также устойчивый дефицит осадков и аномально теплая погода в апреле и мае. Значительная аномалия почвенной влажности на европейской части территории РФ летом 2010 г. способствовала поддержанию атмосферной засухи. Выявлено, что наиболее обширная область существенного дефицита почвенной влаги летом 2010 г. наблюдалась в Приволжском и Центральном федеральном округе РФ. Пространственная структура и временная динамика почвенного увлажнения и его аномалии весной и летом 2010 г., выявленная по спутниковым данным, хорошо согласуется с результатами, полученными по данным наблюдений за запасами продуктивной влаги в пахотном слое.

Ключевые слова: аномалии влажности почвы, почвенная засуха, стандартизированный индекс осадков и испаряемости, дистанционное зондирование, европейская территория России

Введение

Засуха на юге и в центре европейской территории России – явление нередкое. В условиях меняющегося климата проблема засух приобретает особую актуальность в связи с продолжающимся с 1980-х гг. летним потеплением на европейской части территории России (Попова, 2014) и общим увеличением количества и общей длительности тропосферных блокировок в Северном полушарии в летний сезон (Мохов, 2011). Однако в ряду случаев обширных сильных засух на европейской территории России (ЕТР) летняя засуха 2010 г. бесспорно является неординарным событием не только по площади охвата, интенсивности и длительности, но и по продвижению северной границы засухи в те регионы, в которых в период инструментальных наблюдений засуха такой интенсивности не наблюдалась (Черенкова, 2012). Суровая засуха 2010 г. на ЕТР обозначила круг новых проблем, связанных с последствиями ее распространения в бореальную ландшафтную зону, возникновением лесных и торфяных пожаров, приведших не только к катастрофическим последствиям для экосистем, частичной утрате лесного фонда, но и, что крайне важно, к возникновению угрозы здоровья людей.

Интерес к рекордной жаре 2010 г. в России инициировал множество научных публикаций как со стороны отечественных, так и со стороны зарубежных исследователей. Генезису засухи 2010 г., определению ее места в ряду подобных событий (как на ЕТР, так и на территории Европы), поиску исторических аналогов в прошлом и установлению причин возникновения столь суровой засухи было посвящено множество научных статей (например, Мещерская и др. 2011; Фролов, Страшная, 2011; Шмакин и др. 2013; Barriopedro et al., 2011,

и многие другие). С точки зрения возможности прогнозирования аналогичных событий не менее интересны исследования механизмов блокирования, особенности взаимодействия планетарных и синоптических волн, а также выявления роли глобальной атмосферной циркуляции и аномалии температуры поверхности океана как возможных предикторов засухи (Мохов, 2011; Попова, 2014; Petoukhov et al., 2013; Trenberth, Fasullo, 2012; Wright et al., 2014).

С одной стороны, в качестве основной причины возникновения волны тепла на европейской территории России в 2010 г. указывается естественная изменчивость климата (Dole et al., 2011). С другой стороны, отмечается, что тепловой рекорд июля 2010 г. на ЕТР не был бы достигнут без глобального потепления климата (Rahmstorf, Coumou, 2011). Но все же вопрос о том, была ли связана ли жара 2010 г. на территории ЕТР с антропогенным изменением климата, остается открытым...

Влажность почвы играет немаловажную роль как в возникновении засух, так и в их сохранении и поддержании. Благодаря инерционности процессов тепло-влагообмена в почве ее влияние внутри климатической системы может быть долговременным. Исследования с привлечением результатов моделирования по выявлению механизма прямых и обратных связей, связанных с засухой, показали, что недостаток почвенной влаги способен усиливать атмосферную засуху (Ferranti, Viterbo, 2006).

Цель данной статьи состоит в оценке почвенного увлажнения на европейской территории России вне сезона вегетации в период 2009–2010 гг. и в весенне-летний период 2010 г. и изучении их региональных особенностей по данным спутниковых измерений. Особое внимание уделено исследованию условий формирования областей недостаточного увлажнения почвы к началу лета 2010 г. Для оценки возможностей использования спутниковых данных о влажности почвы проведено сравнение динамики почвенного увлажнения по спутниковым данным и по данным наземных наблюдений (Фролов, Страшная, 2011).

Материалы и методы

Привлечение данных дистанционного зондирования для оценки почвенной влаги имеет очевидное преимущество по сравнению с данными измерений *in situ* с точки зрения широты охвата, однородности измерений и свободного к ним доступа через сеть интернет. Недостаток таких данных заключается, прежде всего, в ограниченном временном интервале измерений, необходимости их калибровки и накоплении искажения по мере увеличения густоты растительности (в особенности – для спутниковых данных на основе микроволновых измерений). В данном исследовании оценка аномалий влажности почвы в период с мая по август выполнена с использованием среднемесячных данных суммарного водного эквивалента (кг/м^2) пространственного разрешения $1^\circ \times 1^\circ$ гидрологической модели Noah 2.7.1 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) эксперимента Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) (Rodell et al., 2004). Данные суммарного водного эквивалента получены на основе спутниковых измерений изменений гравитационного поля Земли и их устой-

чивой связи с изменениями распределения масс, не требуют дополнительной калибровки и интерпретировались в исследовании как запасы влаги в почве (мм). Для получения стандартизованных аномалий влажности почвы, используемых в исследовании, в качестве базового периода был взят период 2003–2007 гг. Точное сопоставление границ почвенной засухи в данной работе не проводилось из-за невозможности проведения детального сравнения интенсивности аномалии почвенной влаги по наземным инструментальным измерениям (данные отсутствуют в свободном доступе) и спутниковым данным. Однако, несмотря на это, можно считать, что значения стандартизованной аномалии влажности почвы ниже -1 в вегетационный сезон могут указывать на наличие почвенной засухи.

Для определения интенсивности атмосферной засухи были использованы средне-месячные и 3-х месячные данные стандартизованного индекса осадков и испаряемости (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) в узлах координатной сетки разрешения $1^\circ \times 1^\circ$ на основе глобального архива ежемесячных данных осадков и температуры Университета Восточной Англии (Climatic Research Unit, CRU TS3.1, Begueria et al. 2013). Для получения значений индекса оценивается функция распределения разности ($P - E_0$), где P – сумма осадков за выбранный период, E_0 – суммарная потенциальная испаряемость за тот же период. Для расчета потенциальной испаряемости использован метод Пенмана (Penman, 1948). SPEI, рассчитываемый для периодов различной длины, начиная от 1-го месяца, показывает, насколько 3-х параметрическая функция лог-логистического распределения (наилучшим образом характеризующая функцию распределения значений разности осадков и испаряемости) отклоняется от нормального распределения. В общем случае лог-логистическое распределение является распределением вероятности переменной, чей логарифм имеет логистическое распределение. В результате, полученные положительные значения индекса SPEI свидетельствуют о наличии более влажных, чем нормальные, условий, а отрицательные – о засушливых условиях. Значения SPEI в интервале от -1,5 до -1 означают умеренную атмосферную засуху, от -2 до -1,5 – сильную засуху и ниже -2 – экстремальную засуху. Карты пространственного распределения аномалий среднемесячных сумм осадков в данной работе не приводятся по причине открытого к ним доступа на официальном интернет-ресурсе ВНИИГМИ-МЦД.

Поля высот геопотенциала 700 и 1000 гПа построены по среднемесячным данным из архива NCEP с разрешением $5 \times 5^\circ$ (www.cpc.ncep.noaa.gov/data).

Исследование температур воздуха, сумм осадков, запаса воды в снеге и направления приземного ветра проводилось на основе климатического архива ВНИИГМИ-МЦД срочных, суточных и средних месячных данных (<http://www.meteo.ru>).

Обсуждение результатов

Увлажнение почвы в весенний период существенно зависит от предшествующих условий, включающих температуру и осадки осени, глубину промерзания почвы, снегозапасы

в конце зимы и условия снеготаяния. В результате анализа метеорологических условий за полгода, предшествующие засухе 2010 г., получены следующие результаты. Осень 2009 г. на европейской территории России выдалась теплой и сухой: среднемесячная температура в центре ЕТР в среднем на 2–3° С превысила климатическую норму 1951–1980 гг., а дефицит осадков в среднем составил 40–50% от нормы. Такие условия не способствовали накоплению почвенной влаги: на территории Центрально-Черноземного района и в Среднем Поволжье в осенние месяцы по спутниковым данным зафиксирована пониженная влажность почвы. Ранее было показано (Черенкова, 2012), что зима 2009/2010 г. на европейской территории России была аномально холодной на протяжении всех трех месяцев. Наибольшая аномалия среднемесячной температуры воздуха отмечалась в центральной части Европейской России в январе и составила в среднем -5° С от нормы. В зимний период дефицита осадков практически не было, а на юге и западе территории аномалия осадков превышала норму почти в два раза. На территории Центрально-Черноземного района и в регионе Среднего Поволжья по данным маршрутных снегомерных съемок были отмечены положительные аномалии запаса воды в снеге (мм) по сравнению со средними многолетними величинами. Однако на фоне аномально холодной зимы и глубокого промерзания почвы большая часть выпавших зимой осадков весной ушла в поверхностный сток. Весенние месяцы были теплее, чем обычно: в центре ЕТР средние многолетние температуры воздуха в мае были превышены на 3–4° С. С середины весны в центральных областях Европейской России ощущался недостаток осадков (в апреле до 40% от нормы). Таким образом, возникновение засушливых условий в центральной части ЕТР в начале лета 2010 г. стало результатом влияния ряда факторов, в числе которых теплая и сухая осень, холодная зима (не способствующая пополнению запасов почвенной влаги за счет снеготаяния), а также устойчивый дефицит осадков и аномально теплая погода в апреле и мае.

Рассмотрим, какие условия почвенного увлажнения предшествовали атмосферной засухе 2010 г. Согласно данным спутниковых измерений, в апреле и мае 2010 г. на обширной территории, включающей центр ЕТР и западный Казахстан, наблюдался недостаток почвенной влаги (*рис. 1а и 1б*). При этом распределение аномалий недостаточного атмосферного увлажнения было неустойчивым, с их преобладанием на западе и северо-востоке исследуемой области в апреле, и на востоке – в мае (*рис. 2а и 2б*). Выявленная по спутниковым данным область недостаточного почвенного увлажнения в основном совпадает с обнаруженной по данным наземных наблюдений за почвенной влажностью и соответствует запасам продуктивной влаги в пахотном слое в диапазоне 10–19 мм (Фролов, Страшная, 2011). О дефиците почвенного увлажнения на той же территории весной 2010 г. свидетельствуют и данные индекса почвенной влаги, полученные с помощью микроволновых спутниковых измерений (Золотокрылин и др., 2013; Cherenkova et al., 2013).

Характеристики засухи 2010 г. (в особенности ее атмосферной компоненты) были детально изучены многими авторами. Во втором оценочном докладе Росгидромета говорится о том, что «засуха 2010 г. на европейской территории России, классифицируемая как атмосферная, возникла в начале мая в юго-восточной части Приволжского федерального округа.

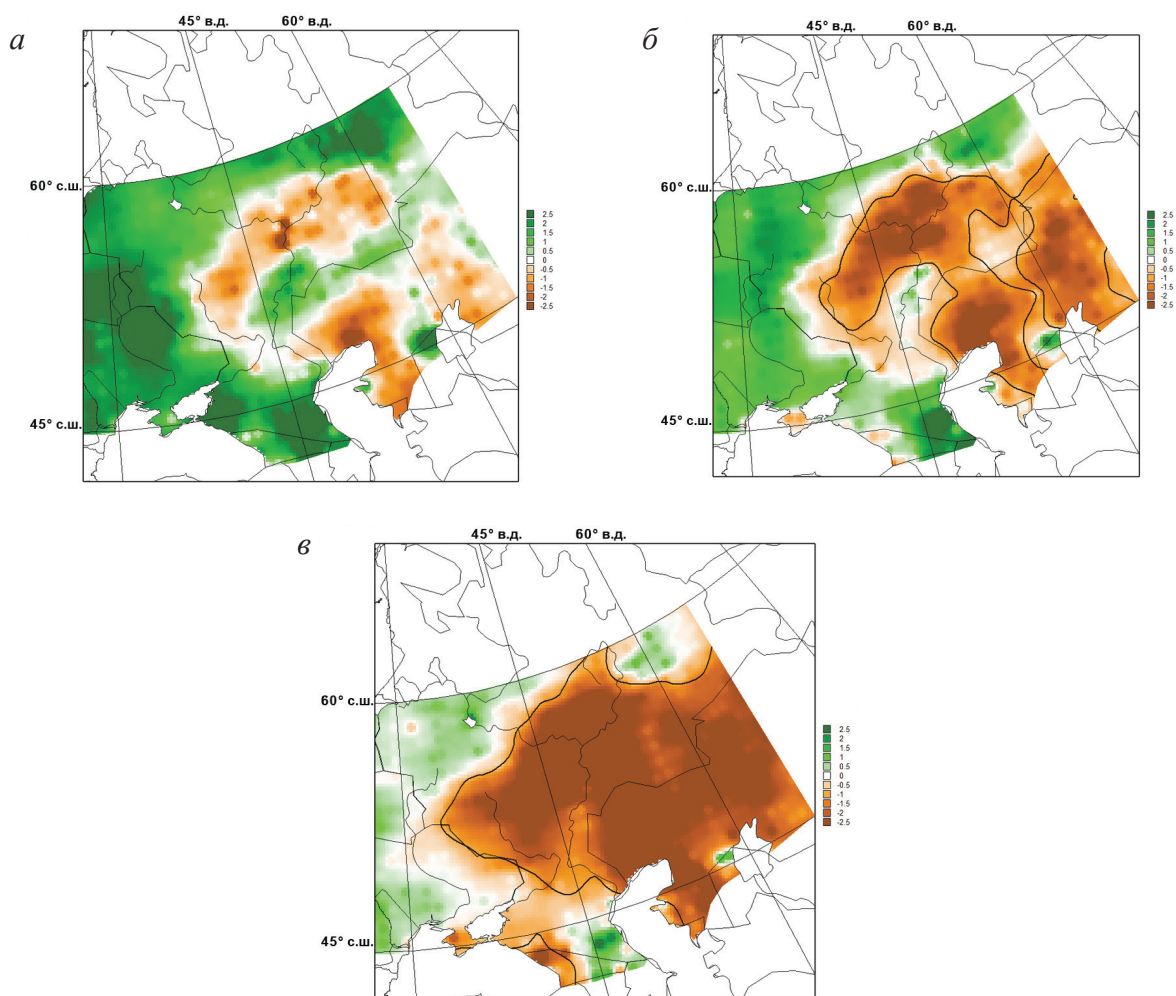


Рис. 1. Аномалия влажности почвы в апреле (а), мае (б) и в июне (в) 2010 г. на европейской территории России. Области избыточного почвенного увлажнения показаны зеленым цветом, области недостаточного увлажнения – оранжевым цветом

В третьей декаде июня на всей территории Центрального федерального округа распространилась сильная почвенная засуха. В июле очень сильная и сильная атмосферная засуха в сочетании с почвенной уже полностью охватила Приволжский и Центральный округа и вышла в южные районы Северо-Западного округа. В июне – июле атмосферно-почвенная засуха почти не прерывалась. Она охватила значительную часть территории Европейской России и продолжалась до 18–19 августа» (Второй оценочный доклад, 2014).

Характерной особенностью июньской ситуации 2010 г. является то, что в этот месяц аномалии почвенной влажности в центре ЕТР существенно не изменились, однако увеличилась область распространения и интенсивность аномалии (рис. 1в). В июле в период максимальных аномалий температуры воздуха и недостатка осадков произошло дальнейшее иссушение почвы. Область дефицита почвенного увлажнения распространилась во всех направлениях, в том числе – к северу, охватив большую часть европейской территории России. В августе сохранялась ситуация аномально низкой почвенной влажности на ЕТР. Наиболее сильной почвенной засухой летом 2010 г. был охвачен Приволжский и Центральный федеральный округ РФ, что согласуется с результатами, полученными в статье (Фролов, Страшная, 2011).

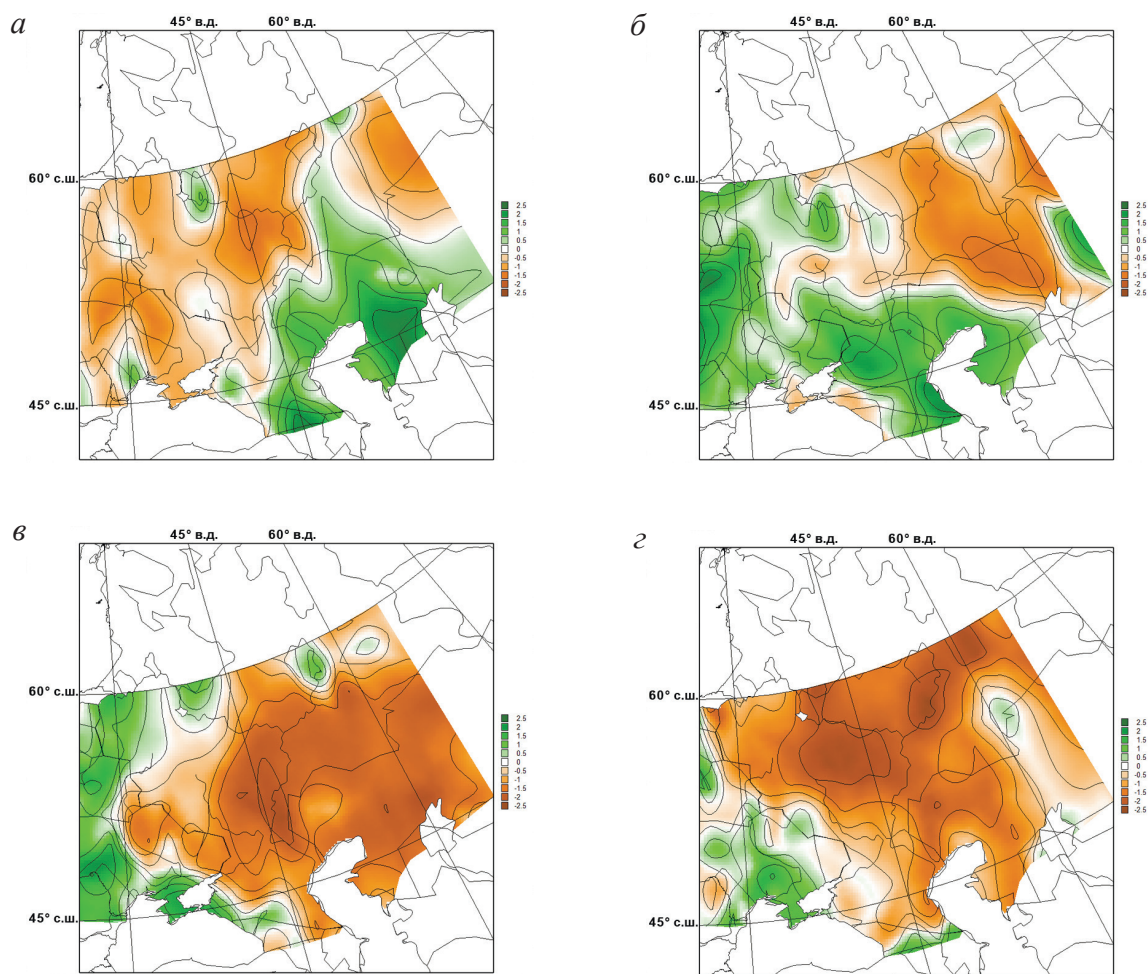


Рис. 2. Динамика атмосферной засухи на европейской территории России в апреле (а), мае (б), июне (в), июле (г) 2010 г. по данным SPEI

Исследования, проведенные на климатической модели ИВМ РАН (Володин, 2011), показали, что наблюдаемый, по крайней мере за месяц до начала засухи, недостаток влажности почвы в близлежащих регионах может оказать влияние на повышение температуры воздуха в эпицентре засухи на $3\text{--}3,5^\circ\text{C}$ в случае, если аномалия почвенной влажности расположена с наветренной стороны очага засухи. Вместе с тем подчеркивается, что влажность почвы влияет только на температуру воздуха у поверхности во время засухи, не оказывая существенного влияния на длительность и интенсивность блокирующего события. Описанная ситуация имела место весной 2010 г., когда недостаток почвенной влаги ощущался на западе Казахстана.

В то же время анализ развития барической ситуации в период с апреля до июня 2010 г. (рис. 3а, б, в) позволяет говорить об усилении антициклонического вихря и его последовательном распространении в направлении области дефицита почвенной влаги. Небольшой гребень в поле высоты геопотенциала 700 гПа, который выявляется в апреле над западом Казахстана, в мае охватывает почти всю ЕТР, а его ось сдвигается в направлении на северо-запад. В июне существенно усиливается градиент давления над севером ЕТР и формируется мощный антициклон с центром над Арало-Каспийским регионом.

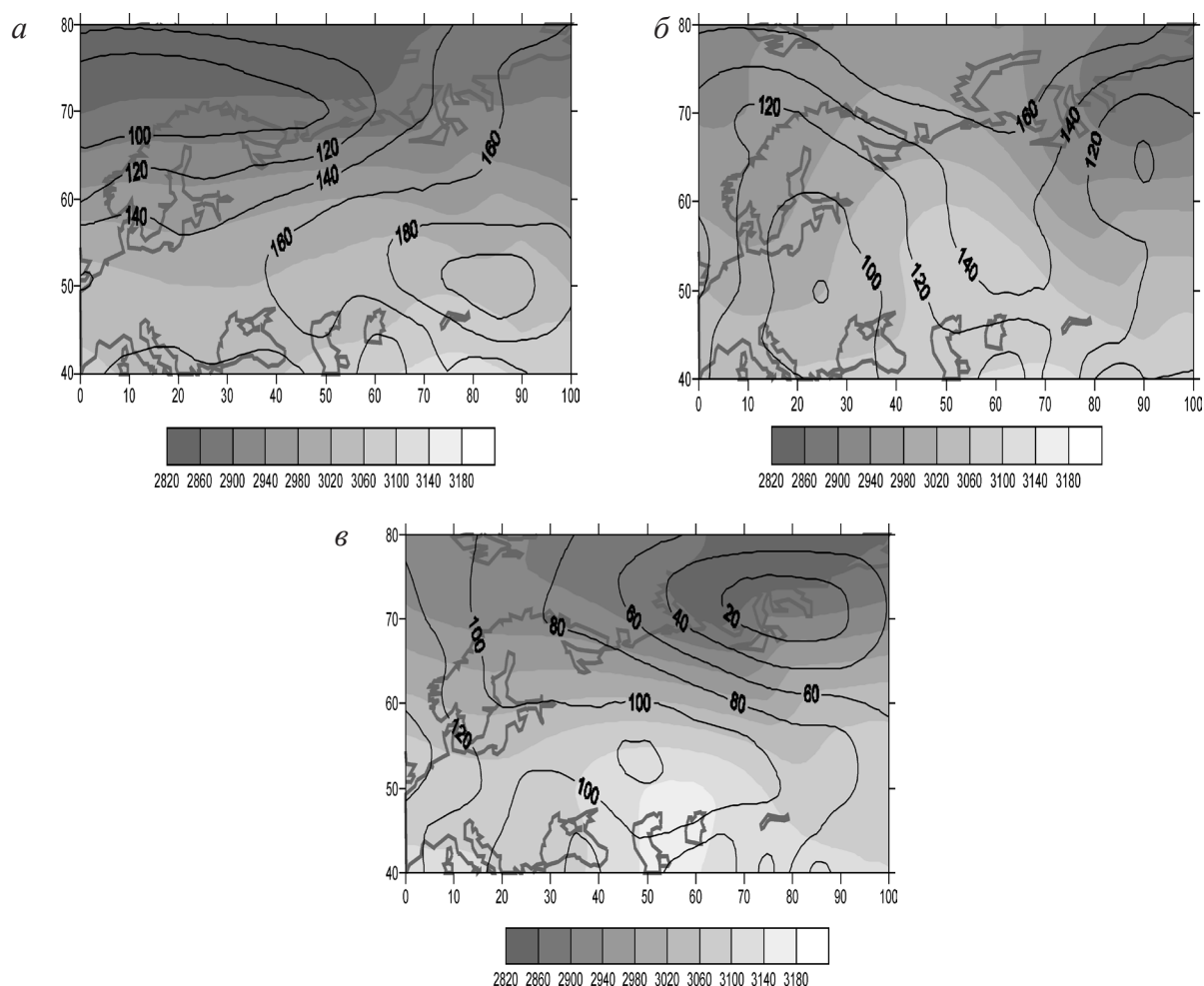


Рис. 3. Поле высоты геопотенциала 700 гПа (заливка) и 1000 гПа (изолинии) в апреле (а), мае (б) и июне (в) 2010 г.

Поле высоты 1000 гПа в апреле, в частности, расположение очага высокого давления с центром над юго-востоком Сибири и севером Казахстана, указывает на устойчивую восточную и юго-восточную составляющую в переносе воздушных масс над южной частью ЕТР, сохраняющуюся в мае и усиливающуюся в июне (рис. 3а, б, в).

Это подтверждается и наземными данными о ветре: в апреле в бассейне среднего течения р. Урал доминировало восточное направление ветра (рис. 4а), а в мае почти на всех рассмотренных метеостанциях, расположенных на границе между европейской территорией России и Казахстана, преобладали юго-восточные и восточные ветра (рис. 4б), переносившие в Поволжье сухой теплый воздух из Казахстана. Аналогичная ситуация повторилась весной 2012 г.: практически на всей территории Казахстана наблюдалась отрицательная аномалия почвенной влажности (выявленная по рассмотренным спутниковым данным), которая в июне распространилась на территорию Западной Сибири. Однако предположение о том, являлось ли наличие аномалии влажности почвы весной на территории Казахстана фактором усиления суровой засухи в Западной Сибири летом 2012 г., требует дополнительного исследования.

Рассмотренные особенности динамики очагов аномалии почвенной влаги и атмосферной засухи, а также эволюция барических полей указывают на то, что наблюдавшаяся

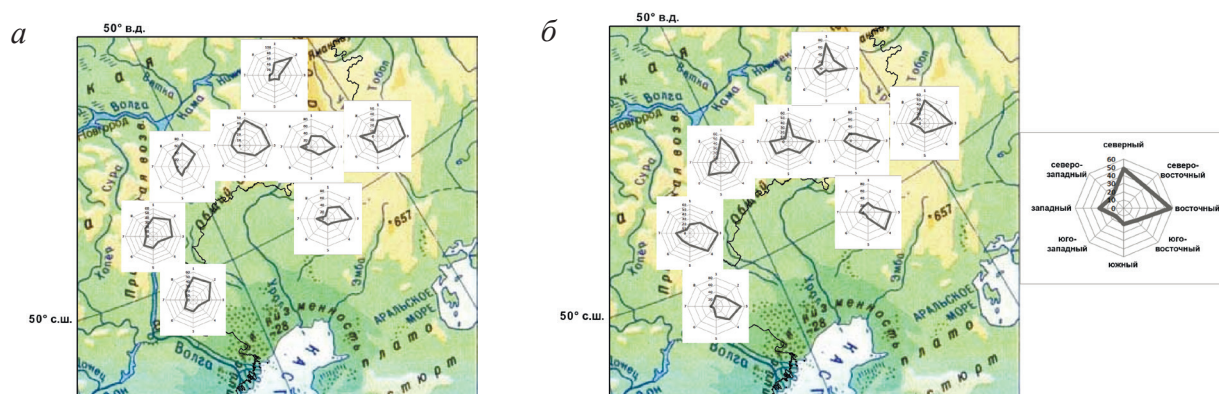


Рис. 4. Направление ветра на метеостанциях на границе между европейской территорией России и Казахстана в апреле (а) и мае (б) 2010 г.

летом 2010 г. на ЕТР почвенная засуха способствовала поддержанию атмосферной засухи. Механизм положительной обратной связи влажности почвы и засухи состоит в следующем. Наличие отрицательной аномалии почвенной влажности можно рассматривать как лимитирующий фактор испарения с подстилающей поверхности, способствующий уменьшению потока скрытого тепла. Поток явного тепла увеличивается, что приводит к повышению температуры воздуха. Усиление волны тепла из-за низкой влажности почвы имело место не только летом в 2010 г. на ЕТР (Lau, Kim, 2012), но и летом в 2003 г. на территории Западной Европы (Ferranti, Viterbo, 2006). Аномалия почвенной влажности может также увеличивать длительность засухи, что связано с инерцией процессов тепло-влагообмена в почве. Подтверждением этого являются эксперименты на глобальных моделях циркуляции атмосферы и океана, согласно которым введение в рассмотрение условий низкой почвенной влажности может способствовать продлению засухи в среднем на 5–10% (Lorenz et al., 2010).

Почвенная засуха летом 2010 г. на ЕТР сопутствовала атмосферной засухе, максимум интенсивности которой пришелся на июнь и июль (рис. 2в и 2г), что в совокупности привело к рекордному недобору урожая сельскохозяйственных культур (Фролов, Страшная, 2011). Причем, если майская и июньская засуха 2010 г. нанесла наибольший ущерб яровым зерновым культурам, то июльская засуха сказалась на снижении урожайности овощных культур и трав. Несмотря на то, что во второй половине августа атмосферная засуха пошла на убыль (прошедшие дожди понизили температуру воздуха), существенный недостаток почвенной влаги в 2010 г. в центре Европейской России, согласно данным дистанционного зондирования, ощущался до поздней осени, что, в частности, создало неблагоприятные условия для осенней вегетации озимых.

Таким образом, особенностью суровой летней засухи 2010 г. было формирование к началу лета устойчивой области недостаточного почвенного увлажнения в центре европейской территории России вследствие уникального сочетания аномалий метеорологических параметров на протяжении трех сезонов с осени 2009 г. до весны 2010 г. Наблюдавшаяся летом 2010 г. на ЕТР почвенная засуха способствовала поддержанию атмосферной засухи и усилению ее негативных последствий.

Заключение

В статье предпринята попытка оценить почвенное увлажнение на европейской территории России вне сезона вегетации по спутниковым данным и проанализировать возможную связь с данными метеорологических и агрометеорологических наблюдений. Сочетание особенностей режима метеорологических параметров осенью, зимой и весной 2009–2010 гг. способствовало формированию засушливых условий и недостатка почвенного увлажнения в начале лета в центре европейской территории России. При этом выявленная область дефицита атмосферного увлажнения была менее стабильной.

Установлено, что наиболее сильный дефицит почвенной влаги летом 2010 г. наблюдался в Приволжском и Центральном федеральном округе РФ, где почвенная и атмосферная засухи, наблюдавшиеся в течение более чем двух месяцев, привели к существенному снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Динамика области недостаточного почвенного увлажнения весной и летом 2010 г. по спутниковым данным согласуется с результатами, полученными по данным наблюдений за запасами продуктивной влаги в пахотном слое (Фролов, Страшная, 2011). Во время наблюдения атмосферной засухи летом 2010 г. на ЕТР почвенная засуха способствовала ее поддержанию и усилению негативных последствий засухи. Несмотря на снижение интенсивности атмосферной засухи в августе, существенный недостаток почвенной влаги в центре Европейской России, согласно спутниковым данным, ощущался вплоть до поздней осени, что, в частности, создало неблагоприятные условия для осенней вегетации озимых.

Оперативный мониторинг спутниковых данных влажности почвы и заблаговременное выявление ее аномалий в весенние месяцы может оказать позитивное влияние на прогнозирование летних засух на европейской территории России.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект 13-05-41058 «Современное потепление летнего сезона в России: циркуляционные механизмы, региональные проявления и последствия для окружающей среды»).

Литература

1. Володин Е. М. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли». «Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». М.: Триада ЛТД, 2011. С.48–57.
2. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Мещерская А.В., Страшная А.И., Черенкова Е.А. Засухи и опустынивание // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М.: ГУ «НИЦ Планета», 2014. С.551–587.
3. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 г. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. №1. С. 246–253.
4. Мещерская А. В., Мирвис В. М., Голод М. П. Засуха 2010 г. на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах европейской части России // Труды ГГО. 2011. Вып. 563. С. 318.

5. *Мохов И. И.* Особенности формирования летней жары 2010г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С.18.
6. *Попова В. В.* Летнее потепление на европейской территории России и экстремальная жара 2010 г. как проявление тенденций крупномасштабной атмосферной циркуляции в конце XX в. — начале XXI в. // Метеорология и гидрология. 2014. №3. С. 37–49.
7. *Фролов А. В., Страшная А. И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур. Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли». «Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года». М.: Триада ЛТД, 2011. С.22–31.
8. *Черенкова Е. А.* Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2012. Т.18. №4 (53). С.13–21.
9. *Шмакин А. Б., Чернавская М. М., Попова В. В.* «Великая» засуха 2010 г. на Восточно-Европейской равнине: исторические аналоги, циркуляционные механизмы // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 6. С. 59–75.
10. *Barriopedro D., Fischer E. M., Luterbacher J., Trigo R. M., Garcia-Herrera R.* The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // Science. 2011. Vol. 332. P. 220–224.
11. *Beguieria S., Vicente-Serrano S. M., Reig F., Latorre B.* Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Int. J. Climatol. 2013. Vol. 34. Issue 10. P. 3001–3023.
12. *Cherenkova E.A., Kononova N.K., Muratova N.R.* Summer drought 2010 in the European Russia // Geography, Environment, Sustainability. 2013. Vol. 1 (6). P. 55–66.
13. *Dole R., Hoerling M., Perlwitz J., Eischeid J., Pegion P., Zhang T., Quan X.-W., Xu T., Murray D.* Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. L06702.
14. *Ferranti L., Viterbo P.* The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions // J. Climate. 2006. Vol. 19. P. 3659–3680.
15. *Lau W. K. M., Kim K.-M.* The 2010 Pakistan flood and Russian heat wave: Teleconnection of hydrometeorological extremes // J. Hydrometeor. 2012. Vol. 13. P. 392–403.
16. *Lorenz R., Jaeger E. B., Seneviratne S. I.* Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37. L09703.
17. *Penman H. L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. Royal Soc., Section-A. 1948. Vol. 193. P. 120–145.
18. *Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J.* Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes // PNAS. 2013. Vol. 110. No. 14. P. 5336–5341.
19. *Rahmstorf S., Coumou D.* Increase of extreme events in a warming world // PNAS. 2011. Vol. 108. No. 44. P. 17905–17909.
20. *Rodell M., Houser P. R., Jambor U., Gottschalck J., Mitchell K., Meng C.-J., Arsenault K., Cosgrove B., Radakovich J., Bosilovich M., Entin J. K., Walker J. P., Lohmann D., Toll D.* The Global Land Data Assimilation System // Bulletin of the American Meteorological Society. 2004. Vol. 85 (3). P. 381–394.
21. *Trenberth K. E., Fasullo J. T.* Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. D17103.
22. *Wright C. K., de Beurs K. M., Henebry G. M.* Land surface anomalies preceding the 2010 Russian heat wave and a link to the North Atlantic oscillation // Environ. Res. Lett. 2014. Vol. 9. P.1–10.

Dynamics of soil moisture in the spring and summer of 2010 in the European part of Russia based on the analysis of remote sensing data

E.A. Cherenkova, V.V. Popova

*Institute of Geography RAS, Moscow, 119017, Russia
E-mail: lcherenkova@marketresearch.ru*

The dynamics of the soil moisture anomalies outside the growing season of 2000–2010 and in the spring and summer 2010 were investigated using satellite data. It was found that a lack of the soil moisture in early summer was caused by a combination of anomalies of meteorological parameters in autumn-spring of 2009–2010 in the center of European territory of Russia. Dry conditions were caused by several factors, including warm and dry autumn, cold winter (which did not support the recharge of soil moisture due to snow melting), rainfall deficit and abnormally warm weather in April and May. Soil moisture anomaly in the summer of 2010 in the European part of Russia contributed to the development of atmospheric drought. It was revealed that the sizeable area of significant soil moisture anomaly and severe atmospheric drought in the summer of 2010 was observed in the Volga Region and in the Central Federal District of Russia. The spatial structure and temporal dynamics of soil moisture and its anomalies obtained using satellite data demonstrate the consistency with the results revealed from the analysis of the agrometeorological stations data.

Keywords: anomalies of soil moisture, soil drought, Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index, remote sensing, European territory of Russia

References

1. Volodin E.M., O prirode nekotorykh sverkhkhektremal'nykh anomalii letnei temperatury (About some anomalies of super-extreme summer temperatures), In: *Issledovaniya po teorii klimata Zemli. Analiz uslovii anomal'noi pogody na territorii Rossii letom 2010 goda* (Earth climate theory studies. Analysis of abnormal weather conditions in Russia in the summer of 2010), Moscow: Triada LTD, 2011, pp. 48–57.
2. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Meshcherskaya A.V., Strashnaya A.I., Cherenkova E.A. Zasukhi i opustynivanie (Drought and desertification), *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii*. (Rosgidromet 2nd evaluation report on climate change and its aftermaths for Russia), Moscow: NITs Planeta, 2014, pp. 551–587.
3. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V., Sravnitel'nye issledovaniya zasukh 2010 i 2012 g. na Evropeiskoi territorii Rossii po meteorologicheskim i MODIS dannym (Comparative study of droughts 2010 and 2012 in the European Russia from meteorological and MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol.10, No. 1, pp. 246–253.
4. Meshcherskaya A.V., Mirvis V.M., Golod M.P., Zasukha 2010 g. na fone mnogoletnego izmeneniya zasushlivosti v osnovnykh zernoseyushchikh raionakh evropeiskoi chasti Rossii (Drought of 2010 with the background of long-term change of dryness in the main the crop regions of the European part of Russia), *Trudy GGO*, 2011, Vol. 563, pp. 318.
5. Mokhov I.I., Osobennosti formirovaniya letnei zhary 2010g. na evropeiskoi territorii Rossii v kontekste obshchikh izmenenii klimata i ego anomalii (Specific features of the 2010 summer heat formation in the European territory of Russia in the context of general climate changes and climate anomalies), *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 6, pp. 1–8.
6. Popova V.V., Letnee poteplenie na evropeiskoi territorii Rossii i ekstremal'naya zhara 2010 g. kak proyavlenie tendentsii krupnomasshtabnoi atmosfernoi tsirkulyatsii v kontse KhKh v. – nachale KhKhI v. (Summer warming in the European territory of Russia and an extreme heat of 2010 as manifestation of tendencies of large-scale atmospheric circulation at the end of the 20th century – the beginning of the 21st century), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 3, pp. 37–49.
7. Frolov A.V., Strashnaya A.I., O zasukhe 2010 goda i ee vliyanii na urozhainost' zernovykh kul'tur (About the drought of 2010 and its impact on the yield of grain crops), *Sbornik dokladov sovmestnogo zasedaniya Prezidiuma Nauchno-tekhnicheskogo soveta Rosgidrometa i Nauchnogo soveta Rossiiskoi akademii nauk "Issledovaniya po teorii klimata Zemli"*. "Analiz uslovii anomal'noi pogody na territorii Rossii letom 2010 goda", Moscow: Triada LTD, 2011, pp. 22–31.
8. Cherenkova E.A., Analiz osobennostei obshirnykh atmosfernykh zasukh na yuge Evropeiskoi Rossii (Analysis of extensive atmospheric droughts features in the south of European Russia), *Aridnye ekosistemy*, 2012, Vol.18, No. 4 (53), pp. 13–21.
9. Shmakina A.B., Chernavskaya M.M., Popova V.V., "Velikaya" zasukha 2010 g. na Vostochno-Evropeiskoi ravnine: istoricheskie analogi, tsirkulyatsionnye mekhanizmy ("Great" drought of 2010 on the East European Plain: historical analogs, circulating mechanisms), *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 2013, No. 6, pp. 59–75.
10. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garcia-Herrera R., The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 2011, Vol. 332, pp. 220–224.

11. Begueria S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B., Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *Int. J. Climatol.*, 2013, Vol. 34, No. 10, pp. 3001–3023.
12. Cherenkova E.A., Kononova N.K., Muratova N.R., Summer drought 2010 in the European Russia, *Geography, Environment, Sustainability*, 2013, Vol. 1 (6), pp. 55–66.
13. Dole R., Hoerling M., Perlwitz J., Eischeid J., Pegion P., Zhang T., Quan X.-W., Xu T., Murray D., Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.*, 2011, Vol. 38, L06702.
14. Ferranti L., Viterbo P., The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions, *J. Climate*, 2006, Vol. 19, pp. 3659–3680.
15. Lau W.K. M., Kim K.-M., The 2010 Pakistan flood and Russian heat wave: Teleconnection of hydrometeorological extremes, *J. Hydrometeor.*, 2012, Vol. 13, pp. 392–403.
16. Lorenz R., Jaeger E.B., Seneviratne S. I., Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, L09703.
17. Penman H.L., Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Royal Soc., Section-A*, 1948, Vol. 193, pp. 120–145.
18. Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J., Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes, *PNAS*, 2013, Vol. 110, No. 14, pp. 5336–5341.
19. Rahmstorf S., Coumou D., Increase of extreme events in a warming world, *PNAS*, 2011, Vol. 108, No. 44, pp. 17905–17909.
20. Rodell M., Houser P.R., Jambor U., Gottschalck J., Mitchell K., Meng C.-J., Arsenault K., Cosgrove B., Radakovich J., Bosilovich M., Entin J.K., Walker J.P., Lohmann D., Toll D., The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, Vol. 85 (3), pp. 381–394.
21. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010, *J. Geophys. Res.*, 2012, Vol. 117, D17103.
22. Wright C.K., de Beurs K.M., Henebry G.M., Land surface anomalies preceding the 2010 Russian heat wave and a link to the North Atlantic oscillation, *Environ. Res. Lett.*, 2014, Vol. 9, pp.1–10.