

УДК 528.088.4:520.626.05[631.425.2]

**Е.В. Василенко<sup>1</sup>, Л.Л. Тарасова<sup>2</sup>****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ С ПРИБОРА ASCAT/МЕТОР  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ**

По данным ФГБУ “НИЦ “Планета”” и ФГБУ “Гидрометцентр России” проведена верификация относительной влажности верхнего слоя почвы по данным с прибора ASCAT (ИСЗ MetOp). Можно утверждать, что “спутниковая” относительная влажность почвы хорошо отражает влажность верхнего 10-сантиметрового слоя, при известных агрогидрологических свойствах почвы (объемный вес, значения предельной полевой влагоемкости и влажности устойчивого завядания) ее можно адекватно пересчитать в запасы продуктивной влаги. Полученные оценки позволяют использовать эти данные для оперативного агрометеорологического мониторинга условий увлажнения почвы в период сева сельскохозяйственных культур. По данным ASCAT (ИСЗ MetOp) можно правильно диагностировать переувлажнение верхнего слоя почвы, и, что особенно важно, их использование позволит существенно повысить качество оперативного мониторинга условий проведения полевых работ в период сева.

*Ключевые слова:* спутниковый мониторинг, относительная влажность, верхний слой почвы, запасы продуктивной влаги.

**Введение.** Влажность почвы, безусловно, один из наиболее важных для сельского хозяйства метеорологических факторов. При недостатке или избытке почвенной влаги нельзя провести полевые работы с хорошим качеством: посеянные в сухую или переувлажненную почву семена могут погибнуть, а в период вегетации в условиях засухи растения испытывают стресс. Поэтому в агрометеорологическом мониторинге влажности почв уделяется повышенное внимание. Вместе с тем детальный анализ поля почвенной влаги в настоящее время затруднен как из-за недостаточной густоты наблюдательной сети [Тарасова, 2008], так и в силу традиционной системы измерений этой величины — раз в 10 дней.

Возможность более детального наблюдения за влажностью почвы не раз поднималась в научной литературе и в дискуссиях на конференциях как агрофизиков, так и агрометеорологов. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области считаются дистанционные наблюдения.

Спутниковые наблюдения за влажностью почвы ведутся уже достаточно давно. В 2006 г. был запущен полярно-орбитальный спутник MetOp-A с усовершенствованным прибором — скаттерометром ASCAT, который испускает импульс, который, отражаясь от Земли, принимают сенсоры спутника. По разнице между значениями интенсивности исходного и отраженного сигнала определяется величина обратного рассеяния  $\sigma^0$ , которая зависит от многих факторов, в том числе от влажности верхнего слоя почвы. В 2012 г. группировка спутников EUMETSAT была дополнена новым спутником MetOp-B с аналогичной аппаратурой на борту.

Методика получения значений относительной влажности почвы по спутниковой информации основана на принципах, представленных в работах [Bartalis et al., 2007, 2008] и заключается в следующем.

По данным высокого разрешения со спутников ERS-1 и ERS-2, а также по данным прибора ASCAT была создана квазистатистическая база данных параметра обратного рассеяния для всей территории Земли. База включает данные с 1991 г. по настоящее время. Поступающая со скаттерометра информация интерполируется в узлы регулярной сетки с помощью функции Хемминга. Обозначим величину обратного рассеяния, как  $\sigma^0(t)$ . Так как значение  $\sigma^0(t)$  сильно изменяется в зависимости от азимутального угла сканирования,  $\sigma^0$  нормируется с учетом этого угла. Затем для отсека “шума” оценивается стандартное отклонение  $\sigma^0(t)$ . Так как интенсивность сигнала обратного рассеяния сильно зависит от угла падения, значения  $\sigma^0$  нельзя сравнивать напрямую и необходимо провести нормализацию значений к углу падения. Таким образом, все измерения  $\sigma^0(t)$  должны быть экстраполированы к эталонному углу 40°. Это позволяет получить кривую годового хода значений обратного рассеяния и ее производных для каждой точки сетки. Затем эмпирически подбираются такие углы падения, при которых влияние растительности на обратное рассеяние минимально, а влияние влажности почвы, напротив, максимально. Считается, что относительная влажность почвы для данной точки пропорциональна отношению текущего значения обратного рассеяния к минимальному и максимальному значению обратного рассеяния, заре-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, мл. науч. с.; ФГБУ “НИЦ “Планета””; e-mail: wittmann20@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, науч. с., канд. геогр. н.; ФГБУ “Гидрометцентр России”; e-mail: lydia\_tarasova@mail.ru

гистрированному за всю историю наблюдений. Таким образом, относительную влажность почвы можно рассчитать по формуле

$$\Theta_s(t) = \frac{\sigma^0(40, t) - \sigma_{dry}^0(40, t)}{\sigma_{wet}^0(40, t) - \sigma_{dry}^0(40, t)},$$

где  $\Theta_s(t)$  — относительная мера (от 0 до 1) содержания воды в поверхностном слое почвы;  $\sigma^0(40, t)$  — измеренная величина обратного рассеяния, нормированная к углу  $40^\circ$ ;  $\sigma_{dry}^0(40, t)$  и  $\sigma_{wet}^0(40, t)$  — величина обратного рассеяния, нормированная к углу  $40^\circ$  для максимально сухих и влажных условий соответственно;  $t$  — номер дня в году.

Величина обратного рассеяния формируется исключительно в поверхностном слое почвы, соответственно значения влажности почв относятся только к верхнему слою, в описании [Bartalis et al., 2007] авторами указано, что толщина этого слоя  $\leq 5$  см.

Таким образом, в силу того что полученная величина не связана с наземными измерениями (например, с измерениями фактической влажности почвы в некоторых опорных пунктах или с данными с каких-либо агрогидрологических карт и т.п.), в первую очередь необходимо выяснить, что значит относительная влажность почвы по данным прибора ASCAT и как она соотносится с наземными данными.

Ранее эти массивы данных со спутников о содержании почвенной влаги были детально исследованы учеными из Испании, Франции, Италии, Люксембурга и Австрии. Наиболее полные, на наш взгляд, выводы представлены в заключительном междисциплинарном отчете “Последовательная валидация спутниковой влажности почвы и модельных продуктов с наземными измерениями для выбранных участков в Европе” [Consistent..., 2010], где убедительно доказано, что “спутниковая” влажность почвы хорошо согласуется с наземными данными, отражает ее изменения во времени, пространственное распределение и экстремальные значения. Вместе с тем в силу того что в указанной работе для сопоставления использован индекс почвенной влаги, который не используют отечественные агрометеорологи, нами предпринята попытка выполнить собственную верификацию “спутниковой” влажности почвы с помощью данных о запасах продуктивной влаги в почве, измеренных на сети станций Росгидромета.

**Материалы и методы исследований.** Мы использовали базы данных ФГБУ “НИЦ “Планета””, ФГБУ “Гидрометцентр России” и Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. В соответствии с соглашением Росгидромета и EUMETSAT ФГБУ “НИЦ “Планета”” оперативно получает данные с зарубежных спутников по системе международного обмена EARS (EUMETSAT Advanced Re-transmission Service). Система позволяет получать ряд данных, в том числе данные об относительной

влажности верхнего слоя почвы со скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B).

Данные формируются в виде файлов и передаются в формате BUFR, затем их необходимо декодировать. Создаются два вида продуктов — данные о влажности почвы с разрешением 12,5 км, а также ежедневные композиты по федеральным округам, интерполированные в регулярную сетку с шагом 12,5 км. В ФГБУ “НИЦ “Планета”” с апреля 2013 г. накапливается база данных о влажности почвы, полученных с прибора ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B) для территории Южного, Северо-Кавказского, Центрального и Приволжского федеральных округов.

Для решения поставленной задачи в нашем распоряжении имелись архивы отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра, составленные по данным наблюдательной сети. Сопоставление проводилось с массивами данных о запасах продуктивной влаги в верхнем (0—10 см), пахотном (0—20 см) и метровом (0—100 см) слоях почвы под всеми сельскохозяйственными культурами.

**Результаты исследований и их обсуждение. Сопоставление относительной влажности почвы по данным с прибора ASCAT с запасами продуктивной влаги в верхнем слое почвы.** Первичный визуальный анализ полученных летом 2013 г. слайдов “спутниковой” относительной влажности почвы с полями запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы под яровыми и озимыми зерновыми культурами показал их высокую согласованность. Выявлено, что ареалы высоких и низких значений “спутниковой” влажности совпадают с районами избыточного и недостаточного увлажнения пахотного слоя почвы. Вместе с тем в отдельных районах в спутниковых данных проявились локальные максимумы и минимумы, не прослеживающиеся на картах запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы. Также отметим значительную детализацию полученных полей, что неудивительно, так как даже в хорошо освещенных агрометеорологической информацией регионах, например в центральных черноземных областях, среднее расстояние между двумя близлежащими станциями составляет  $\sim 75$  км, варьируя от 25 до 150 км. Иными словами, хотя сеть гидрометеорологических станций в нашей стране достаточно густая, отобразить все особенности пространственного распределения почвенной влаги она, по-видимому, не может.

При сравнении абсолютных значений относительной влажности верхнего слоя почвы по данным ASCAT с запасами продуктивной влаги возникают определенные сложности. Здесь нужно учитывать, что агрометеорологи не используют в своей работе понятие “относительная влажность почвы”, эта терминология используется в основном в агрономии, где под относительной влажностью почвы понимают отношение влаги, содержащейся в каком-либо слое почвы, к предельной полевой влагоемкости (ППВ) этого слоя. Заметим, что предельная полевая

влагоемкость — количество воды, которое удерживается в порах почвы после ее полного увлажнения и свободного стекания избыточной влаги, — не является в полном смысле слова предельной. Теоретически в почве все поры могут быть заполнены водой (полная влагоемкость) и относительная влажность при переувлажнении почвы может быть выше 100%. Вместе с тем, учитывая достаточно быстрое стекание лишней почвенной влаги [Будаговский, 1955; Судницын, 1979; Глобус, 1983] и достаточно большой размер ячейки скаттерометра (12,5×12,5 км), такое событие представляется нам маловероятным.

На первом этапе было важно понять, как соотносятся максимальная измеренная со спутника влажность почвы и предельная полевая влагоемкость. В качестве рабочей гипотезы было принято, что они эквивалентны.

Чтобы проверить эту гипотезу, необходим массив агрогидрологических констант (объемный вес почвы, ее скважность, значения предельной полевой влагоемкости и влажности устойчивого увядания) [Процеров, 1953]. Представленный в монографии А.В. Процерова массив, к сожалению, чрезвычайно

ограничен (всего 15 разрезов на европейской части России), как в силу сложности и ресурсозатратности метода определения предельной полевой влагоемкости (поэтому эту характеристику определяли не на каждом почвенном разрезе), так и из-за существенных изменений, происходивших в нашей стране и наблюдательной сети Росгидромета почти за полвека. Современная агрогидрологическая информация отрывочна и труднодоступна. К сожалению, сейчас практически не издаются справочники агрогидрологических свойств почв.

Характеристики почвенных разрезов (дата отбора проб и координаты разреза, тип почв), по которым в дальнейшем проводилось сопоставление значений “спутниковой” и измеренной на гидрометстанциях влажности почвы, приведены в табл. 1. Особо отметим, что нами охвачены все основные сельскохозяйственные районы и типы почв, хотя рассмотрено всего 15 разрезов.

На гидрометеорологических станциях отбор проб для определения запасов продуктивной влаги в почве осуществляется на 8-й день декады. Обычно пробы берут на производственных полях, которые

Таблица 1

## Почвенные разрезы

Регион	Станция	Разрез	Дата	Координаты, град.		Тип почв
				в.д.	с.ш.	
Архангельская область	Емецк	3	29.09.1940	41,750	63,467	Почва дерново-подзолистая суглинистая
Республика Карелия	Олонец	15, 16	26.08.1939	32,983	60,983	Почва дерново-среднеподзолистая суглинистая
Ленинградская область	Белогорка	31	28.06.1939	30,133	59,350	Почва дерново-сильноподзолистая суглинистая
Республика Татарстан	Бугульма	218, 219	27.09.1938	52,800	54,583	Чернозем тучный тяжелосуглинистый
Курская область	Обоянь	301	15.06.1949	36,283	51,217	Чернозем выщелоченный на средних суглинках
Оренбургская область	Бугуруслан	197	03.08.1949	52,467	53,667	Чернозем обыкновенный
Пензенская область	Земетчино	303	06.06.1949	42,617	53,500	то же
Самарская	Безенчук	326		49,433	52,983	Чернозем обыкновенный суглинистый
	Большая Глушица			50,483	52,383	Чернозем южный остаточно-карбонатный тяжелосуглинистый
Саратовская область	Ершов	345	06.06.1949	48,283	51,333	Почва темно-каштановая тяжелосуглинистая
Ростовская область	Зимовники	388	29.10.1939	42,483	47,150	Почва каштановая глинистая
	Гигант			41,333	46,517	Чернозем предкавказский карбонатный
Краснодарский край	Тихорецк	423	19.09.1939	40,083	45,850	Чернозем предкавказский карбонатный тяжелосуглинистый на лёссовидном суглинке

могут находиться на удалении несколько километров от станции, однако это расстояние редко превышает 10 км. Поэтому из массивов спутниковой влажности почв за 8, 18 и 28 число — дни определения влагозапасов на станциях — выбраны значения в точках, близлежащих к указанным станциям (радиус окрестности —  $0,02^\circ$  по широте и долготе — равен одному шагу по сетке в каждом направлении). Затем по известным значениям предельной полевой влагоемкости, объемного веса почвы и влажности устойчивого завядания верхнего 10-сантиметрового слоя относительная влажность почвы была пересчитана в значения запасов продуктивной влаги в этом слое почвы, выраженные в миллиметрах водного слоя. Для примера в табл. 2 приведены результаты пересчета “спутниковой” относительной влажности почвы в запасы продуктивной влаги в верхнем слое почвы за I декаду июля 2013 г. В табл. 2 по ряду станций, где влагозапасы определяются под несколькими культурами, приведены интервалы их значений.

На следующем этапе исследования полученные результаты были сопоставлены с запасами продуктивной влаги в верхнем 10-сантиметровом слое

почвы под всеми сельскохозяйственными культурами на данной станции, за которыми ведутся наблюдения. Критерием оценки соответствия рассчитанных значений с измеренными под какой-либо культурой влагозапасами было не просто попадание в соответствующую градацию (плохие, достаточные, хорошие, избыточные), а их совпадение с точностью до 2 мм. Такая величина невязки выбрана нами исходя из допустимых значений ошибки определения запасов продуктивной влаги. В соответствии с “Наставлениями агрометеорологическим станциям и постам” она не должна превышать 10%. Хорошими в верхнем 10-сантиметровом слое почвы считаются запасы продуктивной влаги ~20 мм, 10% от них и составят 2 мм.

В целом по всем станциям за июль 2013 г. для верхнего 10-сантиметрового слоя близкие значения получены в 85% случаев, из чего можно заключить, что действительно *максимальная “спутниковая” влажность близка к предельной полевой влагоемкости*. Скорее всего, это объясняется тем, что “запомненный” за все время наблюдений по прибору ASCAT максимум величины обратного рассеяния, как правило, наблюдается весной, когда после схода снеж-

Таблица 2

Агрогидрологические константы, спутниковая влажность почвы и расчетные и наблюдаемые запасы продуктивной влаги в верхнем 10-сантиметровом слое почвы за I декаду июля 2013 г.

Регион	Станция	ППВ	Влажность устойчивого завядания	Объемный вес	ASCAT относительной влажности почвы	Запасы продуктивной влаги в 0–10 см	
						Расчет	Наблюдения
Архангельская область	Емецк	31,5	5,4	1,1	85–91	24–25	13
Республика Карелия	Олонец	38,7	9,5	1,18	56–65	14–18	16–21
Ленинградская область	Белогорка	21,8	4,2	1,45	68–85	15–21	13–23
Республика Татарстан	Бугульма	47	20,7	1,1	58–60	7–10	5–6
Курская область	Обоянь	28,5	6,7	1,05	33–36	3–6	4
Оренбургская область	Бугуруслан	46,6	19	0,82	55–57	5–6	8
Пензенская область	Земетчино	36,6	15,3	0,8	87–95	13–16	15
Самарская область	Безенчук	35,7	11,6	0,88	30–40	0–3	0–4
	Большая Глушица	33,4	12,6	1,12	38–44	0–4	2
Саратовская область	Ершов	31,3	11,3	1,18	40–46	1–4	3
Ростовская область	Зимовники	28,5	8,5	1,09	12–15	0	0–1
	Гигант	32,6	12,6	1,06	17–23	0	6
Краснодарский край	Тихорецк	32,1	11	1,06	51–56	6–7	9

ного покрова влагосодержание почвы близко к предельной полевой влагоемкости.

В качестве примера в табл. 2 нами приведены данные за I декаду июля 2013 г., так как именно в эту декаду на двух станциях (Емецк Архангельской области и Гигант Ростовской области) получены существенные расхождения значений расчетной и наблюдаемой влажности почвы. По-видимому, такие нестыковки можно объяснить следующим. Пос. Емецк находится в тайге, наблюдения за влажностью почвы здесь ведутся только под картофелем, и, возможно, пробы почвы взяты не на производственных полях, а на частном огороде наблюдателя. Как ни мал пиксель скаттерометра, все же огород, как нам кажется, не простирается на 12 км. Для станции Гигант существенную невязку можно приписать ошибкам либо в наблюдениях, либо в исходных данных при определении (заметим, что во вступительной статье к справочнику [Процеров, 1953] написано, что в распоряжении составителя были только готовые материалы, проверить которые не представлялось возможным).

Далее нами была предпринята попытка экстраполировать “спутниковую” влажность почвы в более глубокие слои, так как основная масса корней большинства сельскохозяйственных культур лежит в слое почвы от 10 до 50 см. Это важно с точки зрения получения простой и прямой, т.е. без дополнительных расчетов, оценки влагообеспеченности, а следовательно, и для оценки условий роста и развития растений. В качестве рабочей гипотезы мы приняли, что в слое 10–20 см относительная влажность такая же, как и в верхнем 10-сантиметровом. Расчеты показали, что эта гипотеза ошибочна. В большинстве разрезов различия между рассчитанными и фактическими запасами продуктивной влаги в пахотном слое почвы составляли от 5 до 15 мм. Если принять за 100% фактические запасы в этом слое почвы, то ошибка

составляет  $\geq 50\%$ , т.е. такая оценка не всегда попадает даже в общепринятые градации (плохие, ..., избыточные). Заметим, что этот факт закономерен и объясняется большими вертикальными градиентами влагосодержания почвы [Степанцова, 2012]. Таким образом, напрямую отнести значения относительной влажности почвы, полученные с помощью прибора ASCAT, к пахотному слою почвы не представляется возможным.

Рассмотрим другую возможность экстраполяции значений почвенной влаги — через введение коэффициента пропорциональности (возможно, в пахотном (0–20 см) слое почвы содержится в 2 раза больше влаги, чем в слое 0–10 см, а в полуметровом слое — в 5 раз), т.е. предположим, что величина градиента почвенной влаги постоянна.

Для этого нами рассмотрены все имеющиеся за май–июнь–июль 2013 г. наблюдения за запасами продуктивной влаги в верхнем 10-сантиметровом, пахотном, полуметровом и метровом слоях почвы под всеми сельскохозяйственными культурами. Была рассчитана частота процентного отношения запасов продуктивной влаги в одном слое к таковому в другом (табл. 3). Анализ показал, что в слое 10–20 см содержится примерно  $1/2$  всей влаги пахотного слоя почвы, причем чем шире интервал (40–60, а не 45–55%), тем выше частота попадания. При этом там, где значения малы — в верхнем 10-сантиметровом и пахотном слоях, — ошибки будут малы, а для полуметрового и метрового слоев такая процедура уже неуместна: ошибки вычислений будут существенны. Например, допустим, в 0–10 см содержится 10 мм продуктивной влаги, тогда в пахотном слое с вероятностью 70% будет от 16 до 25 мм, а если 15 мм, то интервал расширится до 25–38 мм, что уже неопределенно (25 мм — достаточные запасы, 38 мм — хорошие).

Интересно, что в среднем за лето 2013 г. доля влаги, содержащейся в слое почвы 10–20 см, по

Таблица 3

Отношение запаса продуктивной влаги (ЗПВ) в разных слоях почвы

Пахотный слой		Полуметровый слой		Метровый слой	
Доля ЗПВ в слое почвы 10–20 см от слоя 0–20 см, %		Доля ЗПВ в слое почвы 0–10 см от слоя 0–50 см, %		Доля ЗПВ в слое почвы 0–10 см от слоя 0–100 см, %	
Узкий интервал					
<45	14	<17	52	<7	54
45–55	48	17–22	27	7–12	36
>55	38	>22	21	>12	10
Широкий интервал					
<40	7	<15	39	<5	38
40–60	73	15–25	52	5–15	58
>60	20	>25	10	>15	3

отношению к таковой в пахотном слое составляет 54%, по отношению к полуметровому слою она составляет 18%, а доля влагозапасов в верхнем слое к метровому — 7%. Иными словами, прямо экстраполировать “спутниковую” влажность почвы верхнего слоя в пахотный с определенной долей вероятности можно, а в более глубокие слои такая экстраполяция возможна только на основе модели почвенной влаги, учитывающей как метеорологические и почвенные условия, так и водопотребление растениями [Кислов и др., 2015].

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что *относительная влажность почвы по данным ASCAT/MetOp-A, хорошо отражает влажность верхнего 10-сантиметрового слоя*, и при известных агрогидрологических свойствах почвы (объемный вес, значения предельной полевой влагоемкости и влажности устойчивого завядания) *ее можно адекватно пересчитать в запасы продуктивной влаги*.

**Возможность применения спутниковых данных по влажности почвы в оперативной агрометеорологической практике.** Возможность проводить ежедневный спутниковый мониторинг почвенной влаги особенно ценна в период сева озимых зерновых культур. Знать степень увлажнения верхнего слоя почвы в этот период чрезвычайно важно, так как оптимальные для прорастания семян запасы влаги определяют появление дружных всходов и благоприятные условия для осенней вегетации озимых [Моисейчик, 1975; Максименкова, 1990]. Недостаточные и плохие влагозапасы в почве в период сева, безусловно, могут быть пополнены осадками, однако не исключено и появление изреженных всходов. В наиболее неблагоприятном случае может наблюдаться переувлажнение почвы, что приводит как к задержке сева из-за невозможности вывести на поля технику, так и к задержке прорастания семян или даже их загниванию из-за плохой аэрации.

Рассмотрим конкретный пример — условия сева в первой декаде сентября 2013 г. Как правило, в конце августа — начале сентября в большинстве районов Центрального федерального округа наступают оптимальные сроки сева озимых зерновых культур под урожай будущего года.

В качестве исходной информации о ходе уборочных работ нами использованы сводки, размещенные на сайте Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. Такие сводки публикуются ежедневно по рабочим дням и содержат информацию о темпах уборки сельскохозяйственных культур и сева озимых (зерновых и рапса). Также за каждый день по данным с прибора ASCAT для территории Центрального федерального округа были построены композиты из нескольких витков. Практически во все дни охват территории спутниковой информацией был не ниже 90%, лишь 5 сентября он составил 80%.

В I декаде сентября 2013 г. практически повсеместно проводился сев озимых зерновых культур под урожай 2014 г. На преобладающей территории Центрального федерального округа агрометеорологические условия для проведения полевых работ в большинстве дней декады были неблагоприятны из-за дождей, высокой влажности воздуха и переувлажнения верхнего слоя почвы, которое местами достигало критериев опасного агрометеорологического явления (ОЯ). В эту декаду на территории округа наблюдалась неустойчивая погода с частыми, а в ряде районов с сильными дождями. Очень сильными дожди были в Брянской, Калужской, Тульской, Московской, Рязанской, Владимирской, Ивановской, Тамбовской и Воронежской областях, на западе Курской, севере Орловской и в ряде районов Липецкой и Костромской областей, где количество осадков в 2—4 раза превысило декадную норму и составило от 40 до 70 мм и более. Наибольшее количество осадков за эту декаду (100—130 мм, или 1,5—2 месячные нормы) выпало в ряде пунктов Московской, Калужской, Рязанской, Владимирской и Ивановской областей. Лишь в Тверской области осадков было мало (2—11 мм, или менее 50% от нормы).

Лишь в последние один-два дня декады, когда дожди в большинстве районов прекратились, а фоновая температура воздуха повысилась, условия для проведения полевых работ улучшились. Таким образом, в I декаде сентября полевые работы велись выборочно и лишь в отдельные дни, когда на возвышенных участках почва просыхала до мягкопластичного состояния.

Из анализа литературных данных можно сказать, что оптимальные условия для проведения обработки почвы, сева, прорастания семян и появления всходов большинства сельскохозяйственных культур находятся в пределах 60—90% ППВ. При относительной влажности  $\leq 50\%$  в почве не хватает влаги для набухания семян, а при влажности близкой к 100% затрудняется аэрация и возможно загнивание семян.

В качестве примера на рис. 1 показаны районы с различной относительной влажностью почвы по спутниковым данным за 7 сентября 2013 г. В этот день из-за сильных дождей доля площадей с избыточно увлажненным верхним слоем почвы была наибольшей за всю декаду (рис. 2). Видно, что в большинстве районов Центрального федерального округа влажность почвы была  $>90\%$ , т.е. складывались крайне неблагоприятные условия, и проведение сева озимых было невозможно. Можно отметить, что мягкопластичное состояние (влажность 60—80%) почвы наблюдалось лишь на части полей в Тверской, Смоленской, Курской, Белгородской областях и на юге Липецкой области.

На рис. 2 видно, что при увеличении доли площадей с очень высокой влажностью почвы темпы

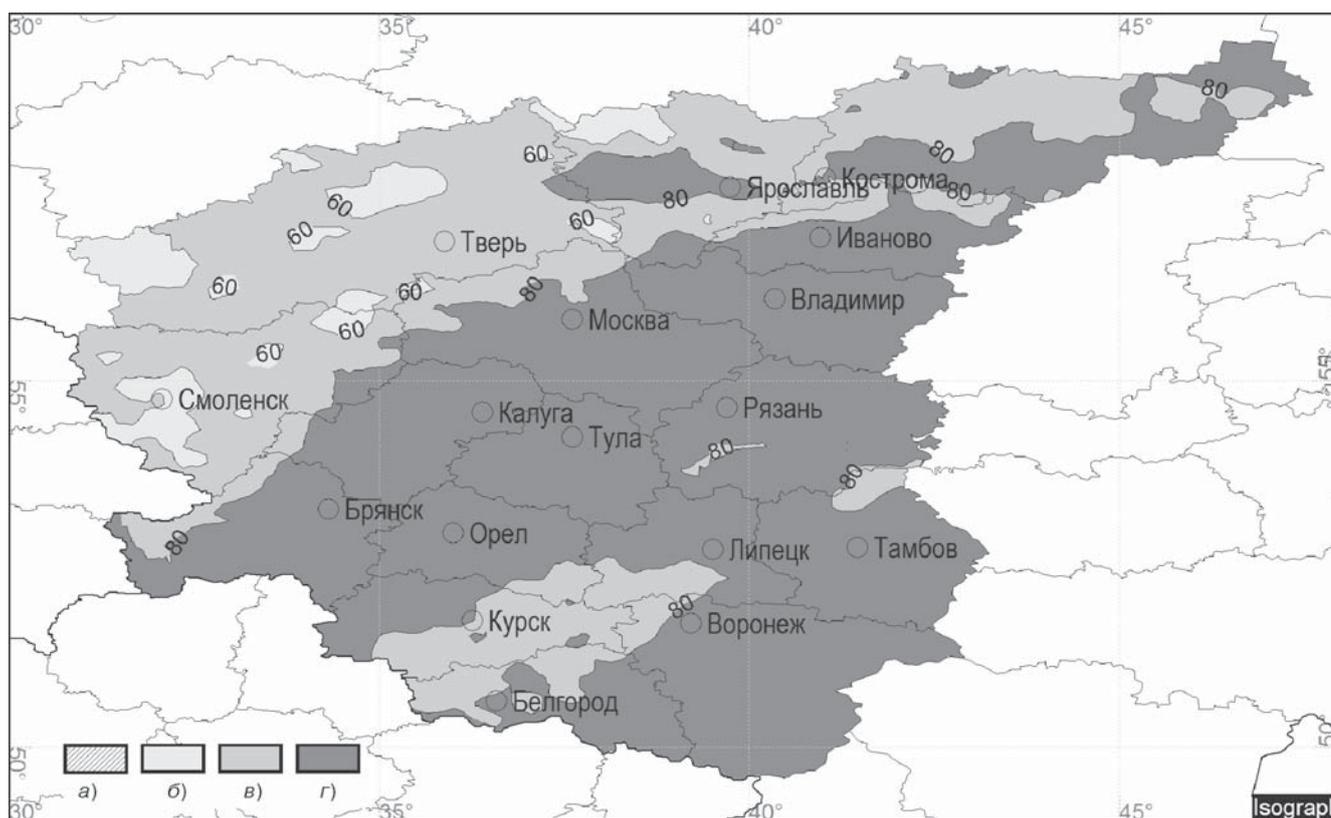


Рис. 1. Относительная влажность верхнего слоя почвы по данным ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B) на 7 сентября 2013 г.: а — <50% ППВ (плохое увлажнение), б — 51–60% ППВ (недостаточное увлажнение), в — 61–80% ППВ (оптимальное увлажнение), г — ≥80% ППВ (переувлажнено)

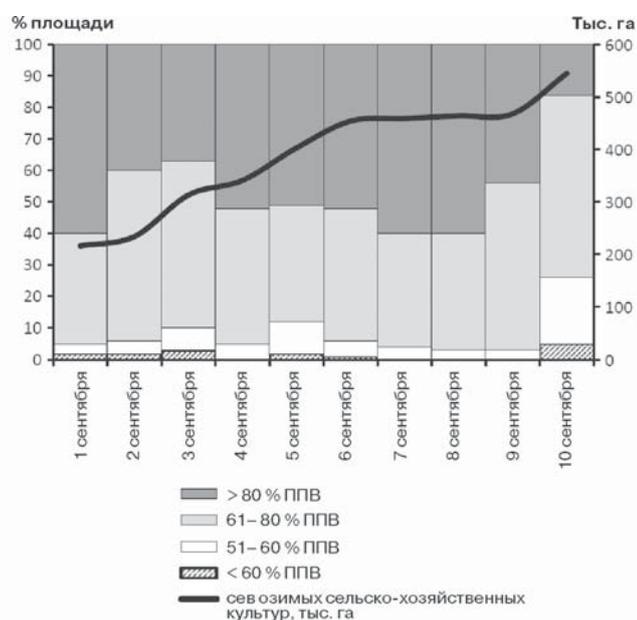


Рис. 2. Доли территории Центрального федерального округа с различной степенью увлажнения верхнего слоя почвы и темпы сева озимых зерновых культур на зерно и зеленый корм и озимого рапса в I декаде сентября 2013 г.

сева замедляются, а при уменьшении — убыстряются. В дни, когда дожди были особенно сильными (6–8 сентября), более чем на 50% площади округа относительная влажность почвы, по спутниковым данным, составила 100%, сев озимых практически остановился. По всему Центральному

федеральному округу за эти дни озимые были посеяны всего на 14 тыс. га, что составляет менее 0,3% от площадей, предназначенных под их посев. В дни без осадков (2–3 и 10 сентября) на большей части территории округа увлажнение почвы было близко к оптимальному, и в эти дни было засеяно почти 270 тыс. га, или 7% площадей. Также отметим, что доля площадей с плохими влагозапасами в верхнем слое почвы практически равна нулю, действительно, по данным сети станций Росгидромета, засушливые явления на территории Центрального федерального округа в I декаде сентября не наблюдались.

Безусловно, сельскохозяйственные земли занимают не 100% территории округа и распределение полей неравномерно (в южной половине округа доля пашни значительно больше, чем в северной), вместе с тем даже такой простой метод дает возможность оценить условия сева. Особенно важно, что информация поступает в оперативном режиме, что позволяет ежедневно оценивать долю территории, охваченную засухой или переувлажнением.

Заметим, что столь хорошая согласованность условий увлажнения и темпов проведения посевных работ получились, по-видимому, из-за аномальности агрометеорологических условий в сентябре 2013 г.

Весной 2014 г. работы по сопоставлению темпов сева яровых культур и площадей с разным увлажнением почвы по спутниковой информации были продолжены. Нами проанализированы данные за

период с 10 апреля по 31 мая 2014 г. В этот период наиболее благоприятные агрометеорологические условия для сева были в III декаде апреля, когда в большинстве областей Центрального федерального округа проходил массовый сев яровых культур.

Наблюдавшаяся в конце апреля теплая и сухая погода ускорила прогревание и просыхание почвы. К середине декады верхний слой почвы достиг мягкопластичного состояния даже в северных районах округа. Для примера на рис. 3 показана относительная влажность почвы по данным со спутника за 24 апреля. Видно, что избыточное увлажнение верхнего слоя почвы наблюдалось лишь в отдельных районах на западе и северо-востоке рассматриваемой территории, на остальной части округа оно было достаточным. Вместе с тем на юго-востоке округа относительная влажность верхнего слоя почвы понизилась до 30% и менее. Такой низкий уровень влагосодержания почвы в значительной степени связан с большим физическим испарением с поверхности почвы вследствие отсутствия осадков в этот период на фоне высокой инсоляции и большого дефицита влажности воздуха.

В целом в III декаде апреля переувлажнение верхнего слоя почвы (по спутниковой информации) наблюдалось лишь на 5—20% территории, в дни с осадками — на 30—40% территории (рис. 4). В таких благоприятных условиях темпы сева практиче-

ски не зависят от влажности верхнего слоя почвы. Видно практически линейное увеличение засеянных площадей; по данным Росстата, в этот период в большинстве центральных черноземных областей была засеяна почти 1/3 от запланированных площадей, а всего, по данным на 30 апреля, яровые культуры посеяны на 70% площадей. Такие темпы сева существенно опережали обычные, а некоторое замедление 26—27 апреля, по-видимому, можно объяснить выходными днями.

В то же время, как уже отмечено, в наших расчетах принимается во внимание вся территория округа, а как показано на рис. 3, переувлажнение почвы наблюдалось в основном в центральных нечерноземных областях, где оптимальные сроки сева приходятся на более поздние сроки. (Отметим, что весной лимитирующим фактором для проведения сева ранних яровых зерновых и кормовых культур является, как правило, подмерзание верхнего слоя почвы.)

Таким образом, основной ограничивающий фактор для проведения полевых работ — переувлажнение верхнего слоя почвы — хорошо прослеживается на спутниковых изображениях относительной влажности почвы по данным скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B), и эти данные можно использовать для оперативного мониторинга условий проведения полевых работ.

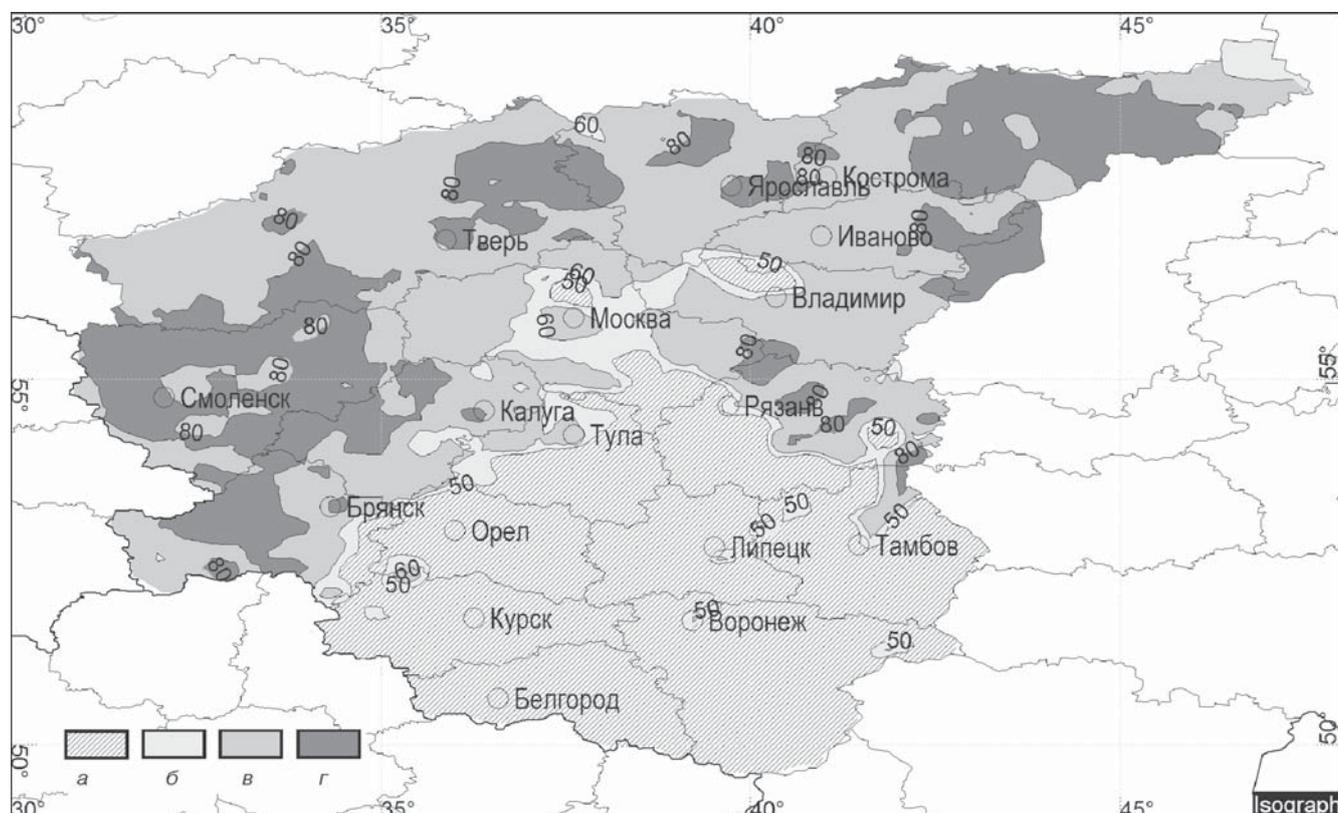


Рис. 3. Относительная влажность верхнего слоя почвы по данным ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B) на 24 апреля 2014 г.: а — <50% ППВ (плохое увлажнение), б — 51—60% ППВ (недостаточное увлажнение), в — 61—80% ППВ (оптимальное увлажнение), г — ≥80% ППВ (переувлажнено)

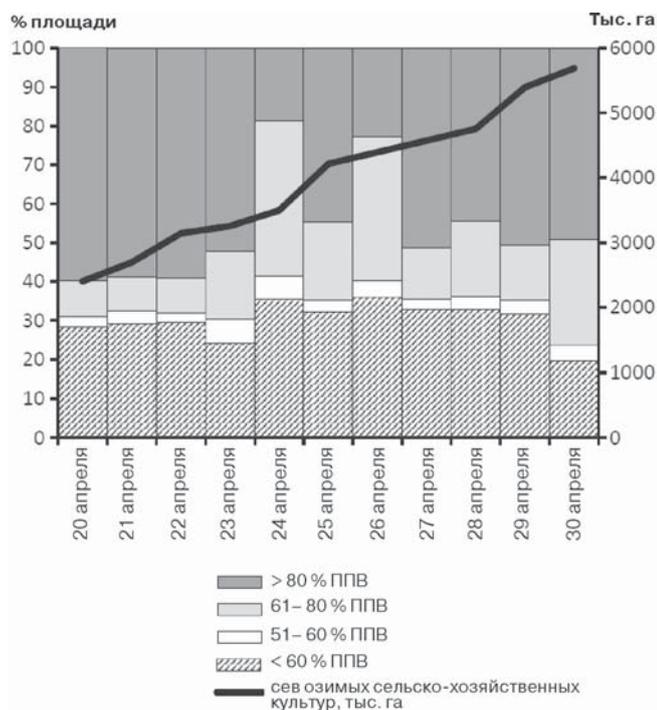


Рис. 4. Доли территории Центрального федерального округа с различной степенью увлажнения верхнего слоя почвы и темпы сева сельскохозяйственных культур в III декаде апреля 2014 г.

#### Выводы:

— относительная влажность почвы по данным скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B), хорошо отражает увлажнение верхнего 10-сантиметрового слоя, и при известных агрогидрологических свойствах почвы (объемный вес, значения предельной полевой влагоемкости и влажности устойчивого завядания) ее можно адекватно пересчитать в запасы продуктивной влаги;

— по данным скаттерометра ASCAT можно правильно диагностировать переувлажнение верхнего слоя почвы, что может существенно повысить качество оперативного мониторинга условий проведения полевых работ в период сева сельскохозяйственных культур.

В дальнейшем возможно создание композитов относительной влажности почвы с учетом маски сельскохозяйственных земель, что, конечно, повысит их информативность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### REFERENCES

Будаговский А.И. Впитывание воды в почву. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 136 с.

Budagovskiy A.I. Vpityvanie vody v pochvu [The absorption of water into the soil], Izdatel'stvo AN SSSR, Moscow, 1955, 136 p. (in Russian).

Глобус А.М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.

Globus A.M. Fizika neizotropnogo vnutripochvennogo vlagoobmena [Physics of non-isothermal subsurface water exchange], Hydrometeoizdat, Leningrad, 1983, 279 p. (in Russian).

Кислов А.В., Варенцов М.И., Тарасова Л.Л. О роли локального состояния влажности почвы весной в формировании крупномасштабных засух Восточно-Европейской равнины // Физика атмосферы и океана. 2015. № 2.

Kislov A.V., Varentsov M.I., Tarasova L.L. O roli lokal'nogo sostoyaniya vlazhnosti pochvy vesnoy v formirovaniy krupnomasshtabnykh zasukh Vostochno-Evropeyskoy ravniny [On the role of the local state of soil moisture in the spring in the formation of large-scale droughts East European Plain], Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015, no 2 (in Russian).

Максименкова Т.А. Методы оценки и прогноза состояния озимых зерновых культур осенью. Обнинск, 1990. 51 с.

Maksimenkova T.A. Metody ocenki i prognoza sostoyaniya ozimyyh zernovykh kul'tur osen'yu. [Methods of assessing and forecasting the state of winter crops in autumn], Obninsk, 1990, 51 p. (in Russian).

Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 294 с.

Moiseychik V.A. Agrometeorologicheskie usloviya i perezimovka ozimyyh kul'tur [Agrometeorological conditions and wintering of winter crops], Hydrometeoizdat, Leningrad, 1975, 294 p. (in Russian).

Процеров А.В. Справочник агрогидрологических свойств почв Союза ССР. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 308 с.

Procerov A.V. Spravochnik agrogidrologicheskikh svoystv pochv Sojuza SSR [Directory agrohydrological soil properties of the USSR], Hydrometeoizdat, Leningrad, 1958, 308 p. (in Russian).

Степанцова Л.В. Агрофизические свойства, гидрологический режим и диагностика черноземовидных почв севера Тамбовской низменности: Автореф. докт. дисс. М., 2012.

Stepancova L.V. Agrofizicheskie svoystva, gidrologicheskij rezhim i diagnostika chernozemovidnykh pochv severa Tambovskoy nizmennosti: Avtoref. dokt. diss. [Agrophysical properties, hydrology and Diagnostics of chernozem soils north of the Tambov plain: Author. doctor. diss.], Moscow, 2012 (in Russian).

Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 255 с.

Sudnicyn I.I. Dvizhenie pochvennoj vlagi i vodopotreblenie rastenij [The movement of soil moisture and water use plants], Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1979, 255 p. (in Russian).

Тарасова Л.Л. Пространственно-временная структура поля запасов продуктивной влаги в почвах черноземной зоны европейской части России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 2. С. 56—71.

Tarasova L.L. Prostranstvenno-vremennaja struktura polja zapasov produktivnoj vlagi v pochvah chernozemnoj zony evropejskoj chasti Rossii [The space-time structure of the field of productive moisture reserves in the soil of the chernozem zone of the European part of Russia] // Vestnik Moskovskogo Universiteta, Serija 5, Geografija, 2008, no 2, pp. 56—71 (in Russian).

Bartalis Z., Naeimi V., Hasenauer S., Wagner W. ASCAT Soil Moisture Product Handbook // ASCAT Soil Moisture Report Ser. 2008. N 15. 22 p.

*Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V.* et al. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) // *Geophys. Res. Lett.* 2007. N 24, L20. 401 p.

Consistent validation of H-SAF soil moisture satellite and model products against ground measurements for selected

sites in Europe // Final Report. 2010. 56 p. URL: [http://hsaf.meteoam.it/documents/reference/HSAF\\_AS\\_09\\_03\\_final\\_report.pdf](http://hsaf.meteoam.it/documents/reference/HSAF_AS_09_03_final_report.pdf) (Accessed: 10.09.2014).

Поступила в редакцию  
25.12.2014

**E.V. Vasilenko, L.L. Tarasova**

#### **APPLICATION OF ASCAT/METOP DATA FOR SOIL MOISTURE MONITORING**

The ASCAT/MetOp data on the relative humidity of the upper soil layer were verified using the information provided by the Planeta State Research Center and the Hydrometeorological Center of the Russian Federation. The satellite data adequately reflects the humidity of the top 10-cm thick soil layer. If the agricultural properties of soil, such as its volume weight, maximum field moisture capacity and the permanent wilting point, are known they could be recalculated into the productive moisture reserves. The resulting estimates allow using these data for the operative agrometeorological monitoring of soil humidity during the sowing season. The ASCAT/MetOp data provide for the correct diagnostics of the over-moistening of upper soil layers which is particularly important to improve the operative monitoring of field work conditions during the sowing season.

*Key words:* satellite monitoring, relative humidity of the top layer of soil, productive moisture reserves.