

Объективный анализ влажности почвы на основе полей относительной влажности верхнего слоя почвы по данным с прибора ASCAT (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B) и запасов продуктивной влаги в верхнем 10-сантиметровом и пахотном слоях почвы

Быков Ф.Л.^{1,2)}, Василенко Е.В.³⁾, Гордин В.А.^{2,1)}, Тарасова Л.Л.¹⁾

¹⁾ ФГБУ «Гидрометцентр России», ²⁾ НИУ ВШЭ, ³⁾ ФГБУ «НИЦ «Планета»

Влажность почвы является одной из компонент водного баланса климатической системы. Традиционно в период вегетации с.-х. культур гидрометстанции определяют запасы продуктивной влаги (ЗПВ) в слоях 0-10, 0-20, 0-50 и 0-100 см. В последнее десятилетие появилась возможность оценить влажность верхнего (примерно 5-сантиметрового) слоя почвы с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В 2006 г. Европейским Космическим агентством (ESA) был запущен полярно-орбитальный спутник MetOp-A и в 2012 г. – MetOp-B с измерительными приборами – скаттерометром ASCAT, данные которых оперативно распространяются посредством системы обмена данных EUMETSAT.

Таким образом, имеется два независимых источника информации о влажности почвы: сравнительно редкие по пространству и времени, но более надежные данные о ЗПВ по всему почвенному профилю с сети станций Росгидромета и ежедневные, с высоким пространственным разрешением, но относящиеся лишь к верхнему слою почвы спутниковые наблюдения относительной влажности (ОВП). Мы оцениваем статистическую структуру поля влажности верхнего слоя почвы по наземным и спутниковым наблюдениям – основу оперативной технологии объективного анализа влажности почвы, использующую оба этих источника.

Оценка статистических свойств ЗПВ

Предварительная оценка КФ ЗПВ

$W_{10}(t_i, \bar{x}_j), W_{20}(t_i, \bar{x}_j)$ – Запасы продуктивной влаги в в 10- 20-сантиметровых слоях почвы соответственно на станциях, расположенных в точках $\bar{x}_j$ в декаду t_i

$$\bar{W}_m(t_i, \bar{x}_j) = \frac{W_m(t_i, \bar{x}_j) - M_t W_m(\bar{x}_j)}{D_t W_m(\bar{x}_j)},$$

где $M_t W_m(\bar{x}_j), D_t W_m(\bar{x}_j)$ – выборочное среднее (оценка математического ожидания) и оценка корня из дисперсии величины $W_m(t_i, \bar{x}_j)$ которые определяются формулами.

$$M_t W_m(\bar{x}_j) = \sum_i W_m(t_i, \bar{x}_j) / N(j), \quad D_t W_m(\bar{x}_j) = \sqrt{\sum_i W_m^2(t_i, \bar{x}_j) / N(j) - (M_t W_m(\bar{x}_j))^2},$$

где $N(j)$ - количество измерений на станции $\bar{x}_j$.

Алгоритм оптимальной интерполяции

Станции расположены нерегулярно. Если нужно приблизить значение нормированного ЗПВ $\bar{W}_m(t_i, \bar{y})$ в произвольной точке $\bar{y}$ в момент t_i времени, то сначала выберем подмножество из $N=6$ «влияющих» станций, т. е. ближайших к $\bar{y}$ станций $\bar{z}_s = \bar{x}_{j_s}$, которые производили измерения в декаду t_i и будем искать оценку $\bar{W}_m(t_i, \bar{y})$, наилучшую в классе линейных:

$$\bar{W}_m(t_i, \bar{y}) \approx A \bar{W}_m(t_i, \bar{y}) = \sum_{s=1}^N w_s \bar{W}_m(t_i, \bar{z}_s),$$

где неизвестные пока веса w_s в сумме должны составлять 1.

$$M_t \left[\bar{W}_m(t_i, \bar{y}) - \sum_{s=1}^N w_s \bar{W}_m(t_i, \bar{z}_s) \right]^2 \rightarrow \min_{w_s},$$

Метод множителей Лагранжа для определения условного минимума

дает систему $N+1$ линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix} 1 & C(d(\bar{z}_2, \bar{z}_1)) & \dots & C(d(\bar{z}_N, \bar{z}_1)) & 1 \\ C(d(\bar{z}_1, \bar{z}_2)) & 1 & \dots & C(d(\bar{z}_N, \bar{z}_2)) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(d(\bar{z}_1, \bar{z}_N)) & C(d(\bar{z}_2, \bar{z}_N)) & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(d(\bar{y}, \bar{z}_1)) \\ C(d(\bar{y}, \bar{z}_2)) \\ \vdots \\ C(d(\bar{y}, \bar{z}_N)) \\ 1 \end{pmatrix},$$

где $C(d)$ – используемая корреляционная функция, d – расстояние. Если при этом какой-то из весов отрицателен: $w_s < 0$, то соответствующую станцию

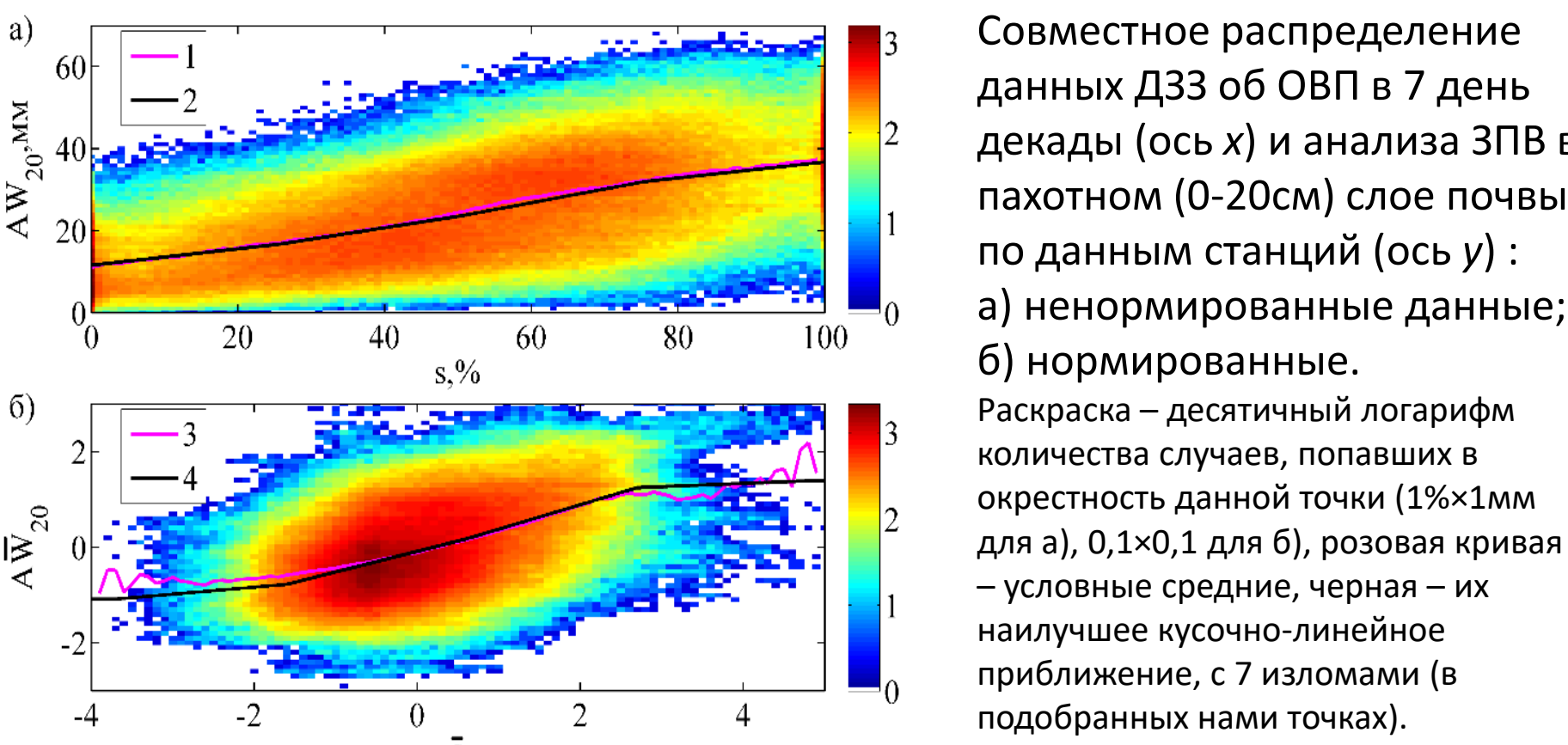
исключим из списка влияющих на узел $\bar{y}$. После такого исключения снова минимизируется функционал (5), но уже с меньшим N .

Это происходит довольно редко (0,23% случаев для узлов сетки в области G ; как правило вблизи границы.

Сравнение анализа наземных наблюдений ЗПВ и данных ДЗЗ о ОВП

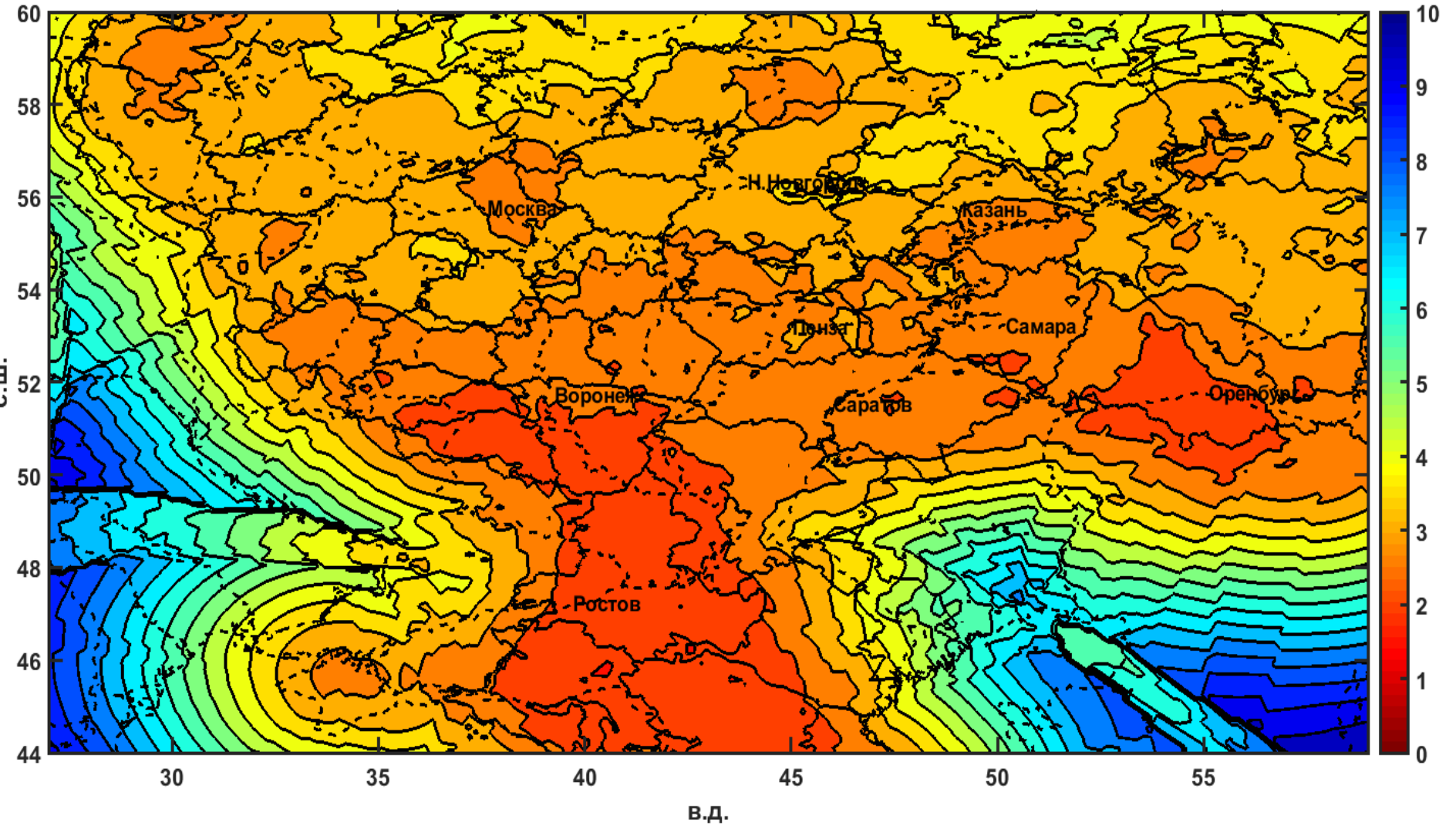
Рассмотрим нормированные данные ДЗЗ:

$$\bar{s}(t, \bar{y}) = \frac{\bar{s}(t, \bar{y}) - M_t \bar{s}(t, \bar{y})}{D_t \bar{s}(t, \bar{y})}.$$



Совместное распределение данных ДЗЗ об ОВП в 7 день декады (ось x) и анализа ЗПВ в пахотном (0-20см) слое почвы по данным станций (ось y) : а) ненормированные данные; б) нормированные. Раскраска – десятичный логарифм количества случаев, попавших в окрестность данной точки (1%×1мм для а), 0,1×0,1 для б), розовая кривая – условные средние, черная – их наилучшее кусочно-линейное приближение, с 7 изломами (в подобранных нами точках).

Осредненная по времени оценка погрешности оптимальной интерполяции наземных данных (мм)



Сделаны оценки объема и точности доступной архивной и оперативной информации и статистической структуры измеренных на сети станций Росгидромета запасов продуктивной влаги и спутниковых измерений относительной влажности почвы верхнего слоя почвы по данным с прибора ASCAT (ИСЗ MetOp).

Предложен алгоритм оптимального (лучшие статистические оценки на нашем архиве) пересчета данных ДЗЗ в ЗПВ для верхних 10- и 20-сантиметровых слоев почвы. Для них по данным сети станций Росгидромета оценены пространственные КФ. Получены приближенные нелинейные связи между данными спутниковых и наземных наблюдений. Предложен метод контроля измерений ЗПВ верхних слоев почвы.

Модель объективного анализа влагозапаса почвы по Европейской территории РФ работает оперативно в тестовом режиме.

Ф.Л.Быков и В.А.Гордин были частично поддержаны грантом № 18-05-0011 в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“ (НИУ ВШЭ)» в 2018 — 2019 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

Пусть $d(\bar{x}_j, \bar{x}_s)$ расстояние между станциями $\bar{x}_j$ и $\bar{x}_s$.

$K_m^*(\bar{x}_j, \bar{x}_s)$ корреляция результатов измерений на этих станциях.

И будем приближать их независимой от конкретнх j и s , а зависящей только от расстояния между станциями $d(\bar{x}_j, \bar{x}_s)$ положительно определенной КФ $C_m^*(d)$

$$K_m^*(\bar{x}_j, \bar{x}_s) = \text{corr}(\bar{W}_m(t_i, \bar{x}_j), \bar{W}_m(t_i, \bar{x}_s)) \approx C_m^*(d(\bar{x}_j, \bar{x}_s)) = \left(1 - \sum_{q=1}^5 \beta_m^q\right) Q_0(d) + \sum_{q=1}^5 \beta_m^q J_0\left(\frac{d}{R_q^*}\right),$$

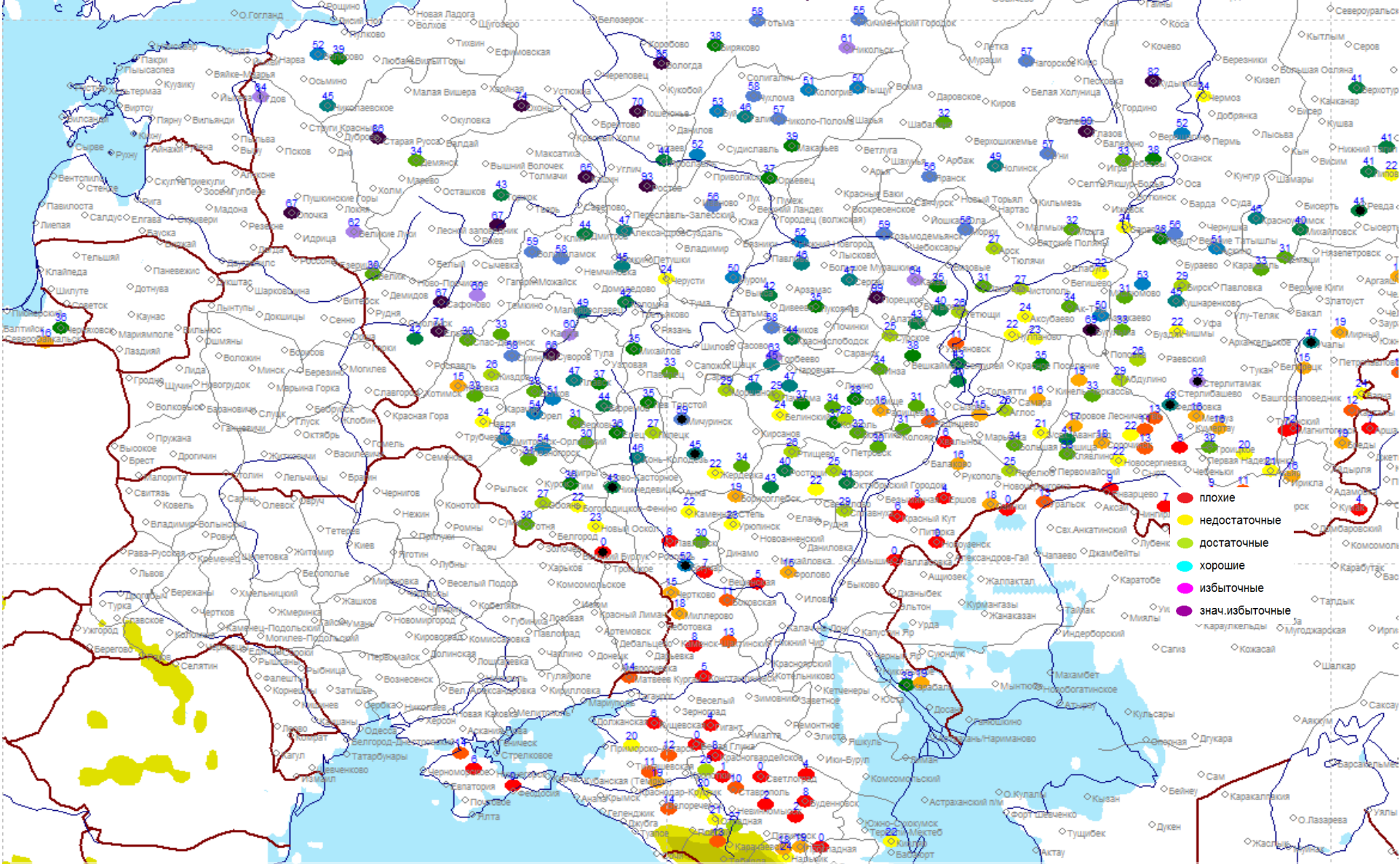
где J_0 – нулевая функция Бесселя, $Q_0(d)$ – индикаторная функция 0,

R_q^* – масштабные коэффициенты (км), β_m^q – безразмерные. Они определяются минимизацией:

$$Q(\beta_m^q, R_q^*) = \sum_{m=10,20} \sum_{j,s} \left[\left(K_m^*(\bar{x}_j, \bar{x}_s) - C_m^*(d(\bar{x}_j, \bar{x}_s)) \right)^2 (N(j, s) - 3)_+ \right] \rightarrow \min_{\beta_m^q, R_q^*}.$$

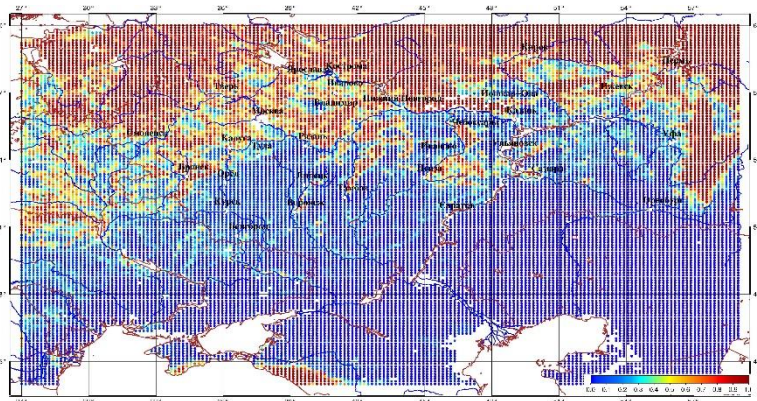
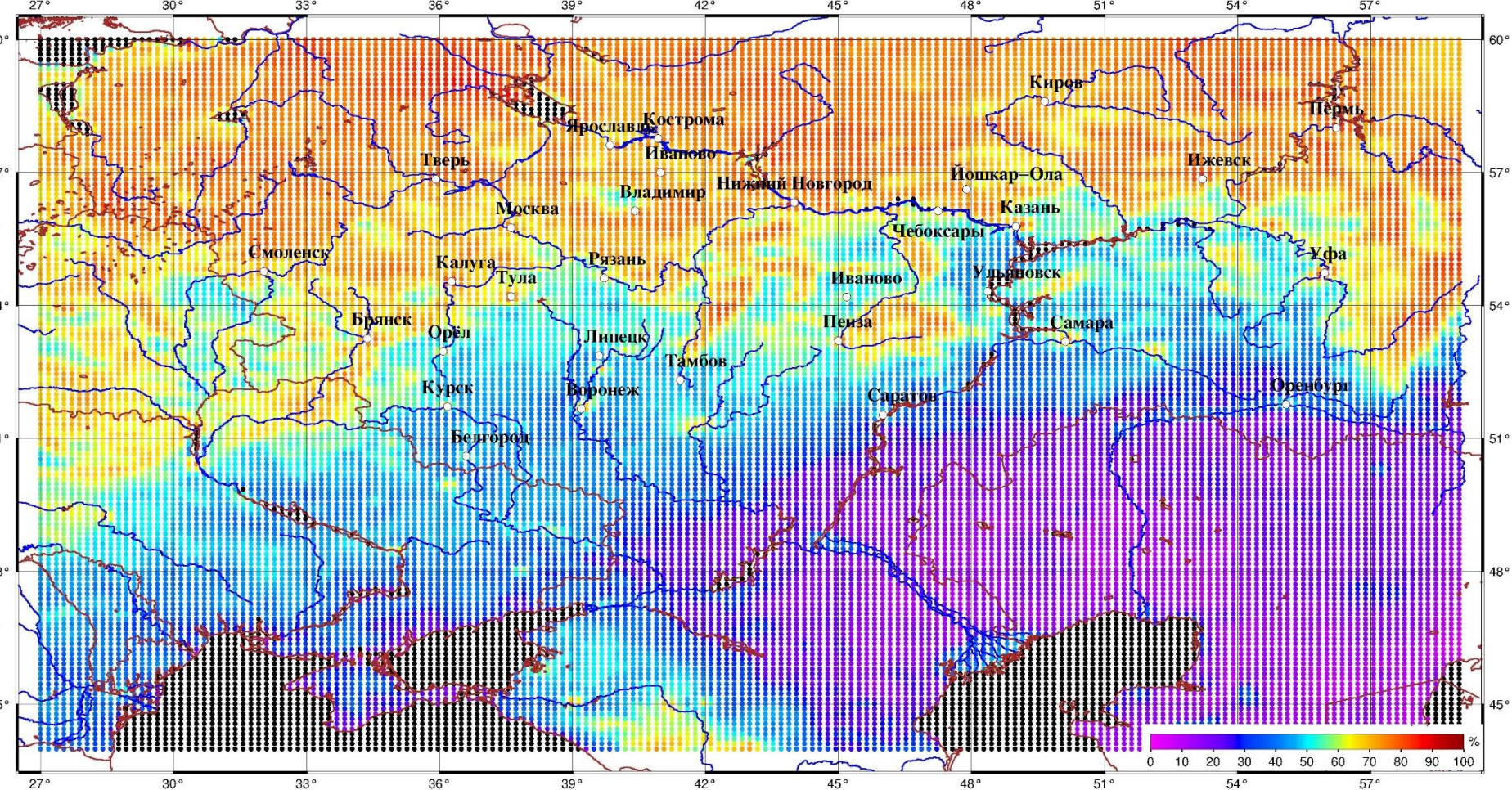
Контроль измерений

Контроль состоял из 2 этапов: на первом отбрасывались нереалистичные (>ПВ, или >35мм в слое 0-10см и >65 мм в 0-20см) запасы влаги. На втором – горизонтальный контроль.



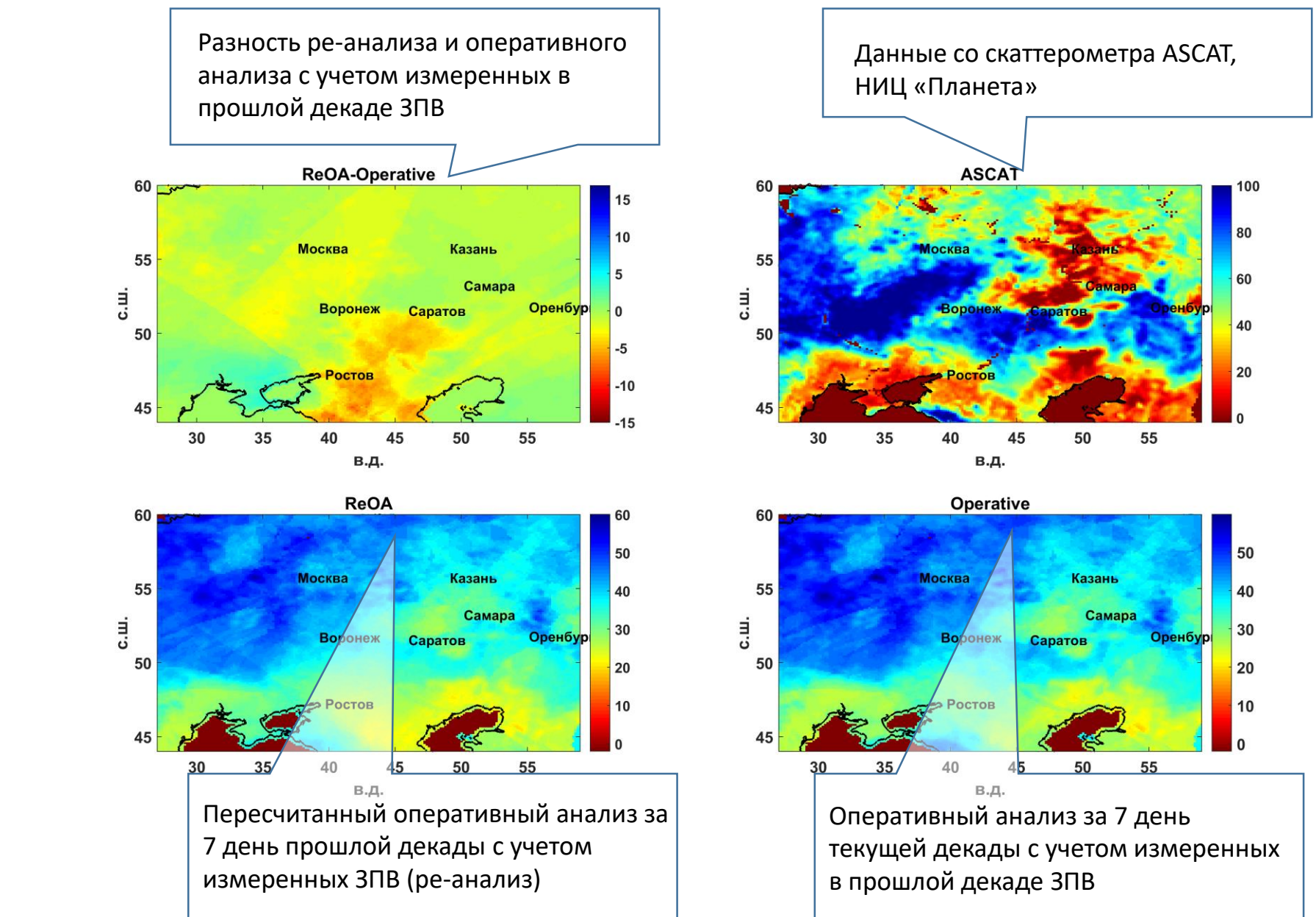
Из 89598 измерений не прошло контроль 7986 (8,9%). Чаще всего наблюдения на станции отбраковывались из-за ошибок в исходной информации (напр., запасы в слое почвы 0-10 см были больше, чем в 0-20 см или в 0-20 см запасы оценивались как избыточные, а в 0-10 см как недостаточные и т.п.).

Средние за исследуемый период значения ОВП (%ППВ), полученные по данным ДЗЗ (сетка 12,5×12,5км)

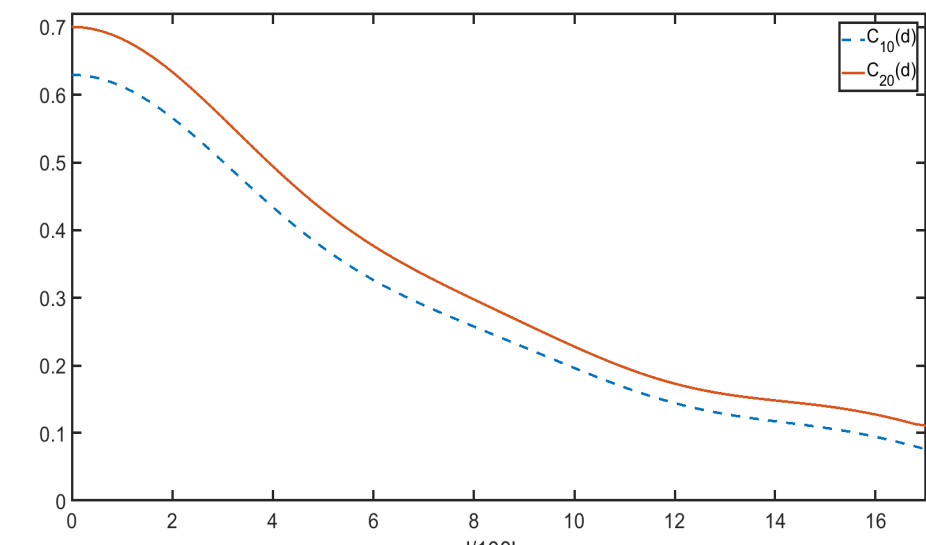


Распределение лесов (красный) и пахотных земель (синий) согласно [Tateishi R., Thanh Hoan N., Kobayashi T., Alsaideh B., Tana G., Xuan Phong D. (2014), Journal of Geography and Geology, 6 (3), http://www.iscgm.org/gm/jgcmo.html], (сетка 12,5×12,5)

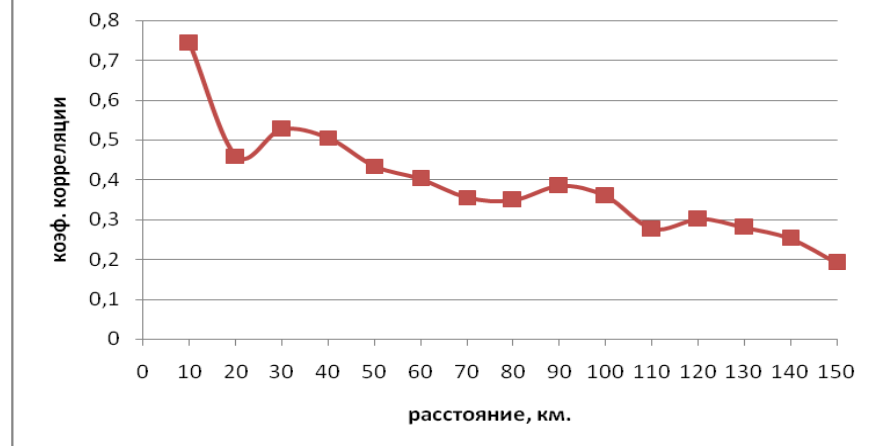
Корреляция доли лесов со средним значением ОВП = 74,4%



Аппроксимации автокорреляционных функций ЗПВ для 10- и 20-сантиметровых слоев почвы



Корреляционная функция полусуточных сумм осадков убывает быстрее



Оценка средних значений ЗПВ с учетом сезонного хода

Для учета годового хода будем после предварительного контроля приближать средние ЗПВ как функцию не только горизонтальных переменных, но и времени года (t_i – декада):

$$W_m(t_i, \bar{x}_j) \approx M_m(t_i, \bar{x}_j) = R_m(\bar{x}_j) + S_m(\bar{x}_j) \sin(\pi t_i / 18) + Q_m(\bar{x}_j) \cos(\pi t_i / 18),$$

где $R_m(\bar{x}_j), S_m(\bar{x}_j), Q_m(\bar{x}_j)$ – коэффициенты, зависящие от станции. В нашем случае оценка всегда удовлетворяет неравенству $M_m(t_i, \bar{x}_j) > 3$ мм при всех значениях индексов i и j .

При аналогичной оценке для корня из дисперсии $T_m(t_i, \bar{x}_j)$:

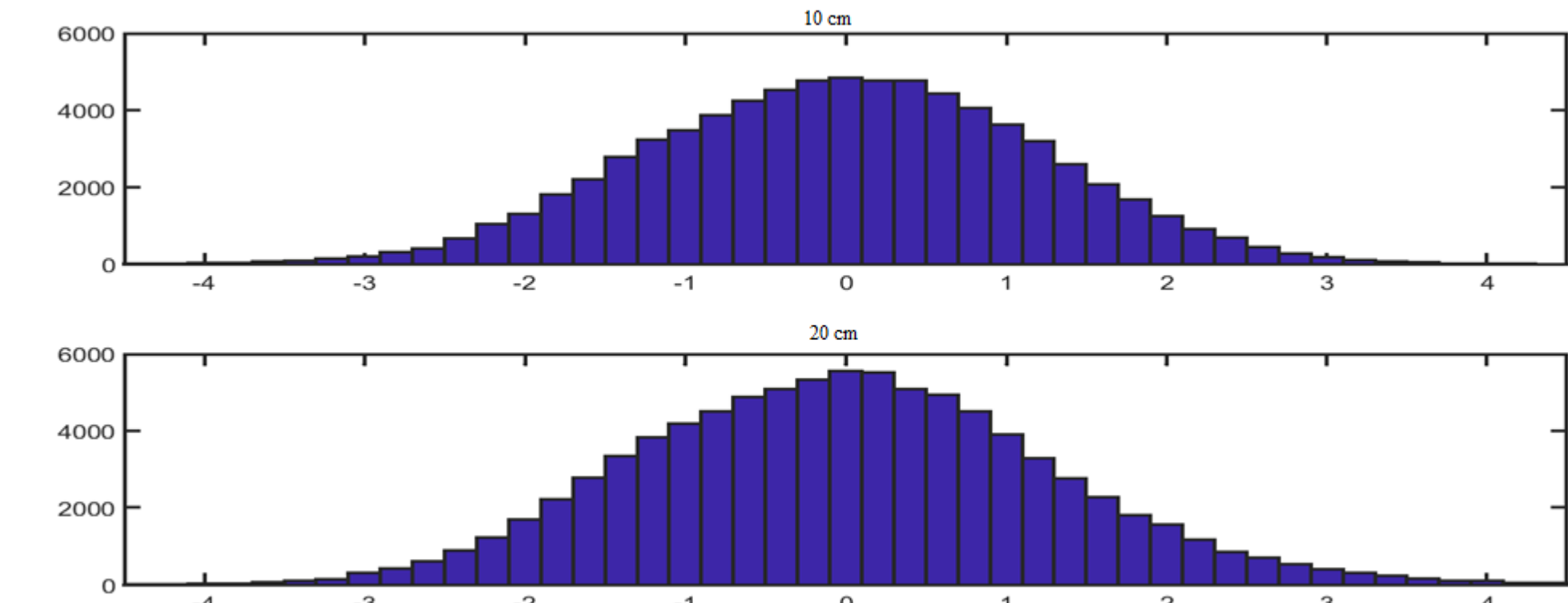
$$|W_m(t_i, \bar{x}_j) - M_m(t_i, \bar{x}_j)| \approx T_m(t_i, \bar{x}_j) = \Psi_m(\bar{x}_j) + \Omega_m(\bar{x}_j) \sin(\pi t_i / 18) + \Theta_m(\bar{x}_j) \cos(\pi t_i / 18),$$

необходимо обеспечить выполнение неравенства $T_m(t_i, \bar{x}_j) > 0$, т. е.

$$[\Psi_m(\bar{x}_j)]^2 > [\Omega_m(\bar{x}_j)]^2 + [\Theta_m(\bar{x}_j)]^2,$$

при оценке по данным архива Гидрометцентра РФ это неравенство не выполнено для 25 из 345 станций.

Распределение нормированного (с учетом сезонного хода) ЗПВ весьма близко к нормальному распределению



Совместный анализ по наземным данным и данным ДЗЗ

Оценим средний квадрат погрешности метода оптимальной интерполяции:

$$E(t, \bar{y}) = \sum_{p,q=1}^N C(d(\bar{z}_p, \bar{z}_q)) w_p w_q - 2 \sum_{p=1}^N C(d(\bar{y}, \bar{z}_p)) w_p + C(0).$$

Зависимость $E(t, \bar{y})$ от времени обусловлена только различиями в наборах влияющих станций в разные моменты времени.

$$\bar{S}_m(t, \bar{y}) = G_m(\bar{S}(t, \bar{y})) - \text{нормированные преобразованные данные ДЗЗ}$$

Оценим квадрат их погрешности как ср. кв. отклонение от анализа для данной точки пространства:

$$G(\bar{y}) = \frac{1}{T} \sum_i (A \bar{W}_m(t, \bar{y}) - \bar{S}_m(t, \bar{y}))^2.$$

Совместный анализ по наземным данным и данным ДЗЗ будем вычислять так:

$$O \bar{W}(t, \bar{y}) = \left(\frac{\bar{S}_m(t, \bar{y})}{G(\bar{y})} + \frac{A \bar{W}(t, \bar{y})}{E(t, \bar{y})} \right) / \left(\frac{1}{G(\bar{y})} + \frac{1}{E(t, \bar{y})} \right).$$

На рисунках приведены поля ЗПВ в пахотном слое почвы за апрель – август 2018 г. Седьмой день декады выбран потому, что согласно регламенту наблюдений в этот день на наблюдательных участках отбираются пробы почвы для определения запасов продуктивной влаги. Показана относительная влажность верхнего слоя почвы по данным с прибора ASCAT, оперативный анализ по эти данным и имеющимся (т.е. определенными в предыдущую декаду) наземным данным, поля ре-анализа (т.е. пересчитанные по наземным данным за истекшую декаду) и разность оперативным анализом и ре-анализом. На рисунках видно, что поля хорошо согласуются друг с другом, а разность между оперативным анализом и ре-анализом не превышает 10 мм продуктивной влаги.