

## Оценка содержания азота и калия в биомассе растений по атмосферно скорректированным гиперспектральным данным дистанционного зондирования

В.Н. Остриков, О.В. Плахотников, А.В. Кириенко, С.И. Смирнов\*

Санкт-Петербургский филиал АО «КБ «Луч»  
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 14а

Поступила в редакцию 6.04.2016 г.

Рассматривается косвенное оценивание содержания азота и калия на опытных агрофизических полях для двух сортов пшеницы — «Эстер» и «Тризо» — путем математического анализа результатов авиационной гиперспектральной съемки в диапазоне от 450 до 850 нм. После предварительной обработки полученных сигналов и проведения внешней калибровки (атмосферной коррекции) снимка (пересчета сигналов прибора в коэффициенты спектральной яркости) оценивалось содержание азота и калия путем сопоставления результатов обработки дистанционных данных с данными лабораторных измерений по процентному составу анализируемых химических элементов в стеблях растений на тестовых делянках. В ходе расчетов применялся метод субпиксельного анализа, где в качестве опорных использовались два средних спектра, вычисленные на тех делянках, которые соответствовали максимальному содержанию азота и калия. Качество полученного результата контролировалось путем сравнения оценок концентраций этих веществ на тех делянках, присутствующих на снимке, спектральные векторы которых не использовались как опорные. Результаты показали существенную зависимость точности получения оценок от сорта зондируемой культуры.

*Ключевые слова:* авиационная гиперспектральная съемка, спектральная идентификация, субпиксельный метод, тематическая обработка спектральных данных; aircraft hyperspectral survey, spectral identification, subpixel method, thematic treatment of hyperspectral data.

Выявление связи пространственного распределения оптических спектральных характеристик данных дистанционной съемки с результатами внесения удобрений и, как следствие, состоянием растительных культур на сельскохозяйственных полях в настоящее время является особо актуальной задачей [1, 2]. Эта актуальность обусловлена необходимостью оперативного и достаточно точного обеспечения агронома информацией о потребностях в подкормке растений, т.е. для своевременного внесения удобрений того или иного типа, а также, в частности, для анализа достаточности таких химических компонент, как азот и калий, на различных участках посевов для реализации продуктивного земледелия (управление прецизионным производством растениеводческой продукции [3–5]). Вместе с тем в настоящее время для решения задач оптимального распознавания состояния растительных сообществ, согласно [5], необходимо иметь достаточное число спектральных каналов, обеспечивающих требуемую точность и надежность получаемых оценок. К этому можно добавить также, что для реализации пространственно-дифференцированного управления посевами необходимо простран-

ственное разрешение не хуже 10 м, а также спектральное разрешение не хуже 5 нм [6]. Обеспечение информацией такого качества спектральными приборами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе космических датчиков — вопрос будущего, поэтому в настоящее время для этой цели используются данные авиационной съемки, которые, во-первых, принципиально позволяют решать поставленную задачу. Во-вторых, эти данные являются прототипом и действующей моделью для последующей разработки и применения спутниковых средств ДЗЗ в аналогичных целях.

Для решения такого рода задач в Санкт-Петербургском (СПб) филиале АО «КБ «Луч» в течение последних нескольких лет проводится работа по созданию авиационного гиперспектрального комплекса, используемого для получения и обработки данных дистанционного мониторинга полей СПб Агрофизического института (ГНУ АФИ РАН). С его применением в течение 2013–2015 гг. проводились натурные съемки для оценки состояния опытных посевов пшеницы двух сортов — «Эстер» и «Тризо» — в период активной фазы созревания на северо-западе РФ (конец июня — начало июля). В комплексе использовался авиационный гиперспектрометр разработки НТЦ «Реагент» (г. Москва) со спектральной чувствительностью в диапазоне 450–850 нм при исходном спектральном разрешении от 0,2 до 5 нм (от начала

\* Вадим Николаевич Остриков (ostrvad@mail.ru); Олег Владимирович Плахотников (rov@kb-lutch.spb.ru); Андрей Васильевич Кириенко (kirienko13@mail.ru); Сергей Игоревич Смирнов (q4ality@yandex.ru).

диапазона к концу). Реализуемое пространственное разрешение — 0,5 м с высоты в 1 км. Комплекс снабжен программными средствами анализа качества спектрального разрешения данных [7], первичной радиометрической коррекции [8], геометрической коррекции [9]. Атмосферная коррекция данных (пересчет измеренных радиометрических величин в коэффициенты спектральной яркости) осуществляется на основе калибрующей тестовой поверхности, попадающей в зону съемки, при этом выбор используемого смещения для учета рассеянной составляющей освещенности осуществляется на основе контроля по дополнительным тестовым поверхностям [10]. Первичная радиометрическая калибровка получаемых прибором измерений изначально реализуется путем модельно-экспериментального контроля с использованием атмосферной модели MODTRAN 5 (для этого проводилась специальная натурная тестовая съемка в условиях отсутствия облачности) [11].

Решение задачи связи оптических характеристик исследуемых посевов на основе гиперспектральной дистанционной съемки представляется сложной проблемой. Причиной этого является тот факт, что концентрация искомых элементов в растениях, проявляющаяся в наличии особенностей их спектральных данных ДЗЗ, существенно зависит от множества влияющих на спектры факторов. На получаемые конечные оценки влияют также выбор используемой гиперспектральной аппаратуры (ее основных свойств и параметров), применение того или иного метода первичной обработки, метода спектрального анализа результатов съемки (непосредственное получение конечных оценок).

Ставится задача косвенной оценки процентного содержания в пшеничных злаках двух наиболее значимых для продуктивности химических элементов — азота и калия — на основе обработки данных воздушной гиперспектральной съемки. При этом в качестве объективных данных используется измеренная наземными агрохимическими методами информация о процентном содержании азота и калия в биомассе колосов на опытных делянках (на основе отобранных проб) [4, 6], непосредственно находящихся в зоне снимка и по этой причине однозначно позиционируемых оператором на полученном гиперспектральном снимке. Отсюда следует возможность рассчитать по результатам съемки опорные значения спектральных векторов на этих делянках.

Тематическая обработка данных гиперспектральной съемки применительно к дистанционной обработке наблюдений растительных сообществ в общем случае может осуществляться достаточно разнообразными методами [12, 13], при этом выбор метода определяется смысловой нагрузкой получаемого решения. В рассматриваемом случае из физического смысла задачи следует целесообразность использования субпиксельного метода спектрального анализа [14].

Эксперимент строился таким образом, что в качестве объекта исследования были приняты два по соседству расположенных участка пшеничных посе-

вов, засеянных различными типами яровых злаков — сортами «Эстер» и «Тризо» — в зоне опытных полей ГНУ АФИ РАН в пос. Меньково (Гатчинский район Ленинградской области). Для обследуемых полей характерна сравнительная однородность по рельефу и типу почвы. Поскольку сорта имеют различия во времени созревания, очевидно, что их фенофазы несколько отличаются, хотя посев производился одновременно. Опытные делянки, по которым за 2 дня до проведения воздушной съемки проводились специальные лабораторные измерения специалистами-агрофизиками, отдельно соответствовали каждому сорту. Следует отметить особо, что для получения достоверных результатов по оценке реальных значений концентраций по означенным химическим веществам время проведения как дистанционной, так и наземной съемки специально привязывается к фенофазе созревания культур. При этом диагностика состояния пшеничных посевов должна проводиться в пределах 1,5–2 нед. Для рассматриваемых опытных полей ГНУ АФИ РАН это сроки от 25 июня до примерно 7–10 июля, хотя в общем случае они зависят от предыстории погодных условий, а также от времени проведения сева и т.д. [3]. Выполнение этого требования принципиально обуславливает возможность решения рассматриваемой задачи получения оцениваемых параметров по данным дистанционной съемки [3, 4].

Привязка результатов воздушной гиперспектральной съемки от 3 июля 2013 г. производилась путем визуальной идентификации делянок оператором, пространственное разрешение аппаратуры обеспечивало не менее десятка спектральных пикселей снимка на каждую. На рис. 1 приведена схема расположения делянок на тестовых полях.

Здесь сорту «Тризо» соответствуют 8 означенных делянок, сорту «Эстер» — 6, на каждой из которых заведомо вносились удобрения различной концентрации. Измеренные в лаборатории процентные содержания азота и калия в колосьях для двух сортов пшеницы на делянках, полученные специалистами ГНУ АФИ РАН, в зависимости от концентрации внесенных азотных удобрений (специально калийные удобрения не вносились) приведены в таблице.

После проведения воздушной съемки полученный спектральный «куб» данных подвергался, во-первых, предварительной обработке с целью снижения регулярного и случайного шумов, а также компенсации строчного «раздергивания» в соответствии с отмеченными выше методами [8, 9], во-вторых, внешней калибровке. Калибровка используется для пересчета исходных сигнальных данных в коэффициенты спектральной яркости (КСЯ), что аналогично их атмосферной коррекции в ходе одновременно проводимой воздушной и наземной съемки специального эталона. В качестве такого эталона использовалось полотнище размером 3×4 м из специального материала (дакрон), обеспечивающее достаточно высокое (около 0,7) и близкое к равномерному распределению значение КСЯ в рассматриваемом спектральном диапазоне [9]. Используемый метод [9] предполагает

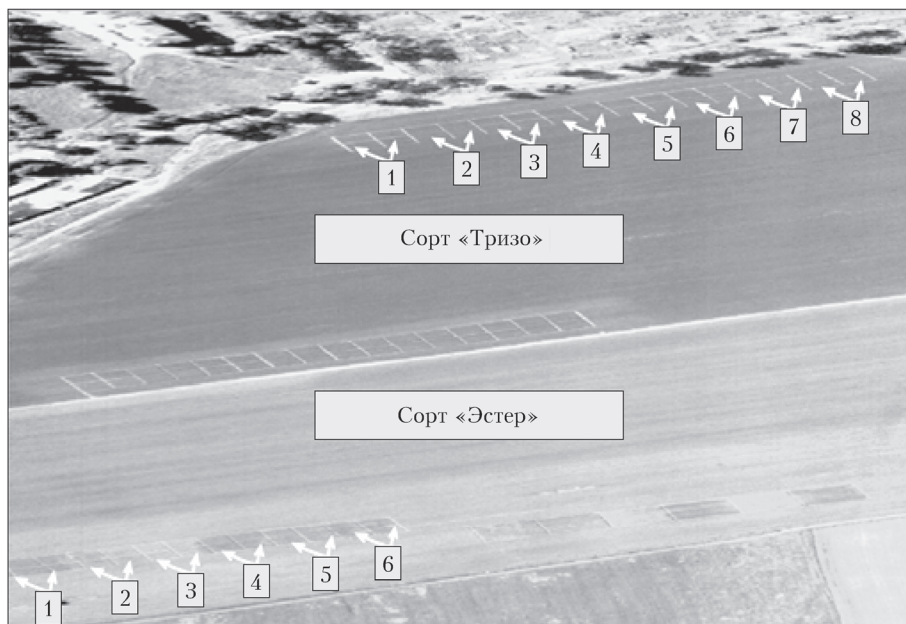


Рис. 1. Схема расположения делянок

Процентные содержания азота и калия на делянках

Номер делянки	Сорт «Тризо»			Сорт «Эстер»		
	Азот, %	Калий, %	Внесено азотных удобрений, кг/га	Азот, %	Калий, %	Внесено азотных удобрений, кг/га
1	1,34	2,06	0	2,43	3,65	150
2	2,60	3,35	210	2,17	3,15	30
3	1,42	2,16	30	1,35	2,60	0
4	2,15	3,19	180	2,48	3,38	120
5	2,02	2,67	60	2,55	3,22	60
6	2,29	2,57	150	1,73	3,09	90
7	2,06	2,96	90	—	—	—
8	2,42	3,35	120	—	—	—

контроль проведенной калибровки на основе измеренных наземной спектральной аппаратурой дополнительных тестовых полотнищ, также попадающих в зону проведения съемки и располагаемых вблизи дакронового эталона. Спектральное разрешение полученных данных авиационного гиперспектрометра в ходе обработки путем нелинейного биннинга приводится к равномерной шкале в 5 нм во всем диапазоне — всего 124 канала. Вычисленные по этим первично обработанным и атмосферно скорректированным данным средние значения КСЯ в диапазоне от 450 до 850 нм на тестовых делянках в зависимости от измеренной в лаборатории концентрации азота приведены на рис. 2. Здесь кривая концентрации 2,06% сорта «Тризо» опущена для ясности представления, поскольку она пересекается с верхними кривыми.

Как видно из рис. 2, информативная часть данных содержится в значениях КСЯ в части спектра свыше 700 нм.

Аналогичные кривые были рассчитаны на тех же делянках применительно к измеренному содержанию калия на каждой из них.

Вторичная обработка данных гиперспектральной съемки сводилась, в соответствии с субпиксель-

ным методом, к оценке для каждого спектрального вектора текущего ( $ij$ ) пикселя снимка составляющих ( $q_{ijo}, q_{ijf}$ ) его проецирования на матрицу опорных спектральных кривых  $S_{of}$ , состоящую из двух  $K$ -векторов  $\{s_{ok}\}_{k=1}^K$  и  $\{s_{fk}\}_{k=1}^K$ , где  $K$  — общее число каналов гиперспектрометра ( $K = 124$ ), по формуле

$$(q_{ijo}, q_{ijf})^T = (S_{of}^T S_{of})^{-1} S_{of}^T \xi_{ij}, \quad (1)$$

где  $\xi_{ij}$  — текущий вектор КСЯ снимка,  $ij \in \{N, M\}$ ,  $N \times M$  — размеры кадра.

При этом применительно к оценке азота и калия соответственно в качестве опоры  $S_{of}$  (в этой матрице строки представляют спектральные «эталон», косвенно отвечающие за величины концентрации оцениваемых элементов) выбирались средние спектральные векторы на тех делянках, для которых концентрации азота и калия были максимальными для каждого сорта. Отсюда по заданным опорным значениям вычисленные составляющие проекций  $q_{ijo}$  и  $q_{ijf}$  в каждом пикселе снимка (скалярные величины, отвечающие за «содержание» в текущем пикселе «степени» присутствия опорных векторов по максимуму азота « $o$ » и калия « $f$ ») соотносились с величинами

концентраций в растениях исследуемых химических элементов.

Сначала по полученному дистанционному снимку рассчитывались проекции всех пикселей на выбранные опорные векторы, соответствующие концентрациям азота и калия применительно к сорту «Тризо», а затем к сорту «Эстер». Отсюда результаты спектральной идентификации оцениваемых концентраций в зависимости от введенных опорных величин зависят от принятых значений по делянкам биомассы растений того или иного сорта.

На рис. 3 приведен результат спектральной идентификации процентного содержания калия, заданного в условных полутонах. Информативность полученных картограмм неравномерна и определена указанными внизу рисунка интервалами, соответствующими этим полутонам.

Сравнение приведенных результатов (рис. 3, *a* и *б*) показывает, что в зависимости от задания опор-

ных векторов по делянкам того или другого сорта существенно изменяется оценка процентного содержания, в данном случае калия, полученная на основе данных ДЗЗ. Разность между образцами *a* и *б* доходит до половины интервала разбиения.

На рис. 4 приведены графики лабораторных измерений и оценок содержания азота и калия применительно к сорту «Эстер» по опорным данным на делянках сорта «Тризо» в зависимости от номера делянки (номера расположены по росту измеренной процентной концентрации). Здесь в качестве опорных векторов были выбраны спектральные векторы на пятой и первой делянке применительно к азоту и калию соответственно.

Полученные результаты показывают, что по содержанию азота оценочные по дистанционным данным величины в рассматриваемом случае достаточно близки к измеренным (ошибки в пределах сотых долей процента абсолютных значений концентраций).

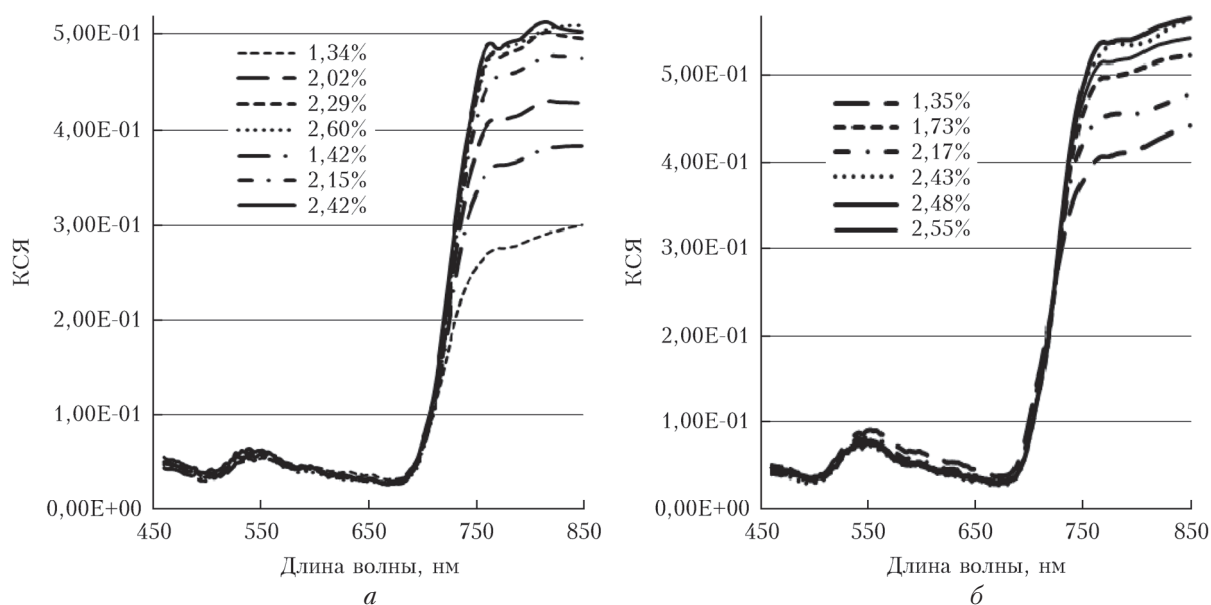


Рис. 2. Средние значения КСЯ на тестовых делянках в зависимости от концентрации азота: *a* – сорт «Тризо»; *б* – сорт «Эстер»

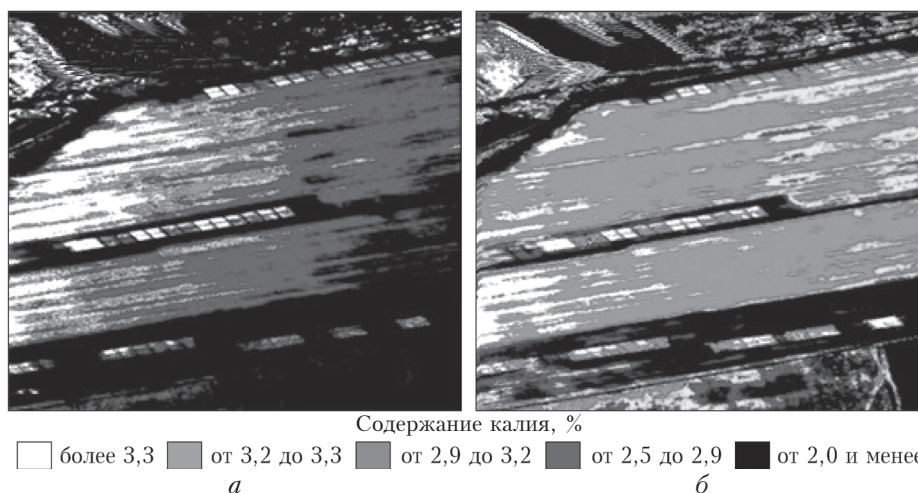


Рис. 3. Результат спектральной идентификации процентного содержания калия: *a* – сорт «Тризо»; *б* – сорт «Эстер»



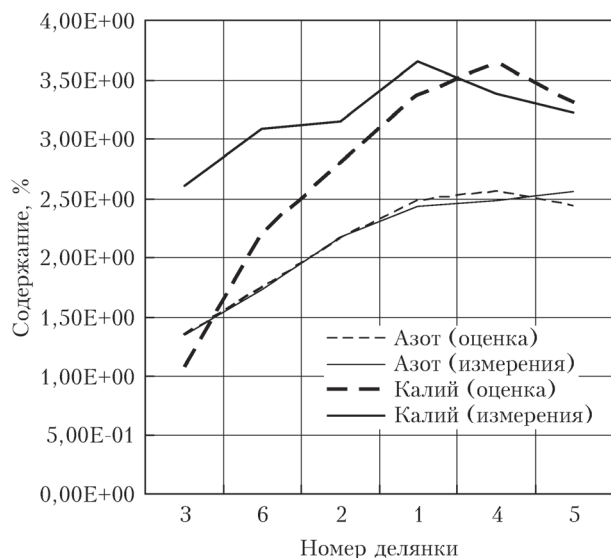


Рис. 4. Графики измерений и оценок содержания азота и калия применительно к сорту «Эстер» по опорным данным на делянках сорта «Тризо»

По содержанию калия косвенные оценки по данным ДЗЗ, что весьма важно, имеют близкую форму к измеренным значениям, при этом наблюдается тенденция сдвига оценочной кривой к меньшим величинам по отношению к измеренной. То есть спектральные проявления растений сорта «Эстер» смещены в ходе оценок концентрации калия по отношению к сорту «Тризо». При этом относительные ошибки оценок составляют от 8 до 58% от истинных значений с уменьшением величин концентрации.

Результаты позволяют сделать вывод о том, что существующие спектральные отличия между различными сортами растений не позволяют в полной мере «прямым» образом, на основе формального математического подхода, строго получать оценки содержания тестируемых химических элементов одной культуры по данным, основанным на измерениях другой. Отсюда следует необходимость использования тестовых данных (наземных измерений концентраций) только по тем культурам, по которым проводится дистанционное оценивание. Это несколько сужает возможности оперативной оценки результатов внесения удобрений по результатам дистанционного исследования больших площадей, где присутствуют смешанные сорта посевов. Можно также сделать вывод о том, что предложенный метод позволяет с точностью по крайней мере до десятых долей процента оценивать содержание азота в растениях рассматриваемого типа. Используемые оценки содержания калия позволяют качественно сопоставлять данные результатов дистанционной гиперспектральной съемки с содержанием этого элемента в биомассе культур различного типа. Несмотря на отмеченные недостатки, дистанционный метод дает возможность проводить сравнительные оценки содержания азота и калия в растениях на том или ином участке поля и корректировать внесение удобрений для управления урожайностью его отдельных частей.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГНУ АФИ РАН за предоставленные данные лабораторных измерений по тестовым делянкам культур.

1. Hatfield J.L. Precision agriculture and environmental quality: Challenges for research and education. U.S. Department of Agriculture in Ames, Iowa, 2000. 15 p.
2. Толтин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «VEGA» // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 581–586.
3. Kanash E.V., Osipov Yu.A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Precision agriculture. Wageningen, Netherlands. 2009. P. 81–89.
4. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of plants nitrogen status by colorimetric characteristics of crop presented in digital images // Precision Agriculture / Ed. by J.V. Stafford, Ampthill, UK. Paper presented at 8th European Conf. on Precision Agriculture, 2011, Prague, Czech Republic, 11–14 July. P. 341–351.
5. Михайленко И.М. Научно-методические и алгоритмические основы оценивания продуктивного и санитарного состояния посевов по данным ДЗЗ // Материалы Всерос. науч. конф. (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября, 2015. С. 37–40.
6. Канащ Е.В. Основные характеристики агрофитоценозов для дешифрирования спектральных данных дистанционного зондирования // Материалы всерос. науч. конф. (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября, 2015. С. 25–28.
7. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кикоть А.В. Оценка спектрального разрешения аппаратуры гиперспектральной съемки по наблюдениям фраунгоферовых линий // Механика, управление и информатика. 2012. № 9. С. 272–276.
8. Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Correlation between hyperspectral imagery preprocessing and the quality of thematic analysis // Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys. 2014. V. 50, N 9. P. 889–891.
9. Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V. Calibration of hyperspectral data aviation mode according with accompanying groundbased measurements of standard surfaces of observed scenes // Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys. 2014. V. 50, N 9. P. 1016–1019.
10. Остриков В.Н., Кириенко А.В. Навигационно-корреляционная коррекция изображений, искаженных взаимными сдвигами строк // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 7. С. 52–57.
11. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В., Шулика К.М. Калибровка данных гиперспектральной аппаратуры авиационной съемки для проведения дистанционного спектрального анализа состояния сельскохозяйственных культур // Материалы всерос. науч. конф. (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября, 2015. С. 20–24.
12. Протасов К.Т., Протасов К.К. Алгоритм распознавания образов по данным гиперспектральной съемки // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 601–604.
13. Белов В.В., Афонин С.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 266 с.
14. Brandt S. Statistical and computational methods in data analysis. New York: INC, 1970. 312 p.

*V.N. Ostrikov, O.V. Plakhotnikov, A.V. Kirienko, S.I. Smirnov.* **Estimation of nitrogen and potassium content in plant biomass for atmospheric corrected hyperspectral remote sensing data.**

An indirect estimation of nitrogen and potassium on experimental agrophysical fields for the two wheat varieties "Ester" and "Trizo" by mathematical analysis of the results of aircraft hyperspectral survey in the range from 450 to 900 nm is considered. After pre-processing of the received signals and performing external calibration (atmospheric correction) of image (conversion from signal space to the spectral brightness coefficients) nitrogen and potassium content is estimated by comparison of the remote data processing results with laboratory measurements of the percentage composition of the analyzed chemical elements in plant stems on test plots. Method of subpixel analysis is used for calculations where as reference are considered two middle spectrums calculated on the plots that corresponded to the maximal content of nitrogen and potassium. The quality of the result is controlled by comparing the concentrations of these substances and estimations of concentrations for those plots that are presented in the image herewith their spectral vectors are not used as reference. The results showed a significant dependence of the accuracy of the estimations on the type of probed culture.