

ОТОБРАЖЕНИЕ СВОЙСТВ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОГО ЗАПОВЕДНИКА В ДИСТАНЦИОННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

© 2023 г. М. Ю. Пузаченко*, @, А. С. Байбар*, **, Ю. Г. Пузаченко*

* Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия

** Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Ленинский проспект, д. 33, Москва, 119071 Россия

@E-mail: m.yu.puzachenko@igras.ru

Поступила в редакцию 14.10.2023 г.

После доработки 18.10.2023 г.

Принята к публикации 18.10.2023 г.

Исследовано отображение гранулометрического состава и цвета почвы по шкале Манселла, измеренных до глубины 135 см с интервалом 5 см на трансекте (длина 6 км) с шагом 20 м, в гиперспектральных данных прибора Гиперион (Hyperion) для 9 сроков измерений с января по сентябрь. Получено, что съемка за 24 мая наиболее связана со всеми рассматриваемыми характеристиками. Для гранулометрического состава наибольшие связи отмечаются для глубин 7–15, 45, 75 и 120 см; для оттенка цвета – 3–10 и 95–135 см; для яркости цвета – 7–15, 25–30 и 65–70 см; для насыщенности цвета – 7–10, 40–50, 75 и 100 см. Гранулометрический состав почвы наиболее связан с длинами волн 579–702 и 529 нм, оттенок цвета – 641–691 нм, яркость цвета – 569–702 и 518–539 нм, насыщенность цвета – 569–702, 508–529 и 732–763 нм.

Ключевые слова: гиперспектральное дистанционное зондирование, гранулометрический состав почв, цвет почв по шкале Манселла, дисперсионный анализ

DOI: 10.31857/S1026347023600887, **EDN:** GULCEF

ВВЕДЕНИЕ

Мультиспектральные и гиперспектральные данные дистанционного зондирования (ГДДЗ) можно рассматривать как характеристики функционирования экосистем в принятом масштабе измерения. В визуальной области электромагнитного спектра поглощение солнечной радиации отражает работу экосистемы по синтезу АТФ, в ближней инфракрасной области – содержание мезофилла и внутриклеточной воды, в коротковолновой инфракрасной – содержание свободной воды, крахмала, лигнина, углеводов и др. (Asner, 1998, 2009; Asner *et al.*, 2011; Blackburn, Steele, 1999; Brauns, Brauns, 1960; Carter, Knapp, Daughtry *et al.*, 2001, 2004; Fourty *et al.*, 1996; Kiang *et al.*, 2007; Neill, Gould, 1999).

Можно принять, что конкретные значения отражения (поглощения) в спектральных каналах описывают состояние конкретной экосистемы в конкретный момент времени. Очевидно, что это состояние определяется не только характеристиками самой растительности, но и условиями среды и, в первую очередь, состоянием почвы и погоды. Оценка свойств почв на основе ГДДЗ является интенсивно развивающимся направлением

(Das *et al.*, 2015; Wójtowicz *et al.*, 2016). В основном оно опирается на непосредственное измерение отражения солнечной радиации от самой почвы (DeTar *et al.*, 2008; Gmur *et al.*, 2012; Hively *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2008), при этом из общего отражения стремятся исключить вклад растительности (Gomez *et al.*, 2015; Summers, 2009). Исследования свойств лесных почв с помощью ГДДЗ практически отсутствуют. В предлагаемом сообщении рассматривается отражение гиперспектральной информацией гранулометрического состава и цвета почвы по трем составляющим почвенной шкалы Манселла (Munsell Soil Color Charts, 1994).

Решаются две задачи: выделение слоев (глубин) почвы, в наибольшей степени определяющих отражение солнечной радиации от растительности, и каналов и сроков съемки ГДДЗ, наиболее связанных со свойствами почвы. Решение первой задачи позволяет выделить слои почвы, наиболее определяющие состояние растительности. Решение второй задачи – оценить, какие особенности функционирования растительности в существенной степени связаны с состоянием почвы. Такой подход можно с полным основанием определить,

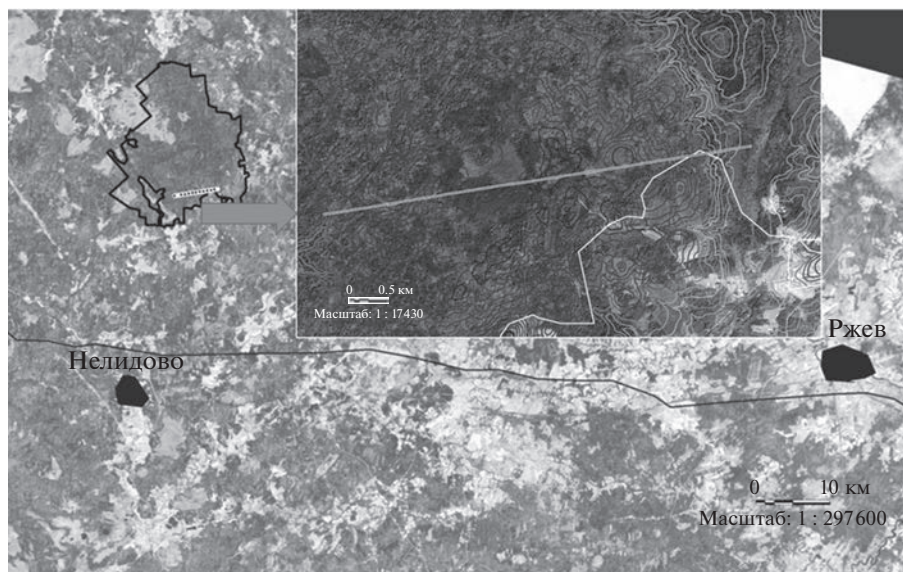


Рис. 1. Положение района исследований.

как экосистемный. Использование ГДДЗ для различных периодов вегетации позволяет выделить время с наиболее активной функциональной связью растительности и почвы, а также элементы динамики этих отношений. Очевидно, что если некоторые свойства почвы хорошо воспроизводятся дистанционной информацией, то их состояния могут быть интерполированы для территории на основе обучающей выборки (Пузаченко и др., 2006).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории южного лесничества Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника на водоразделе Волжского и З. Двинского бассейнов (рис. 1). Рассматриваемая территория расположена на юге Валдайской возвышенности с средними высотами 250–260 м над ур.м. и координатами 32.91463 в.д., 56.46121 с.ш. Территория представлена грядами, в основе сформированными мореной рисского (московского) оледенения, частично перекрытой вюрмской (валдайской) мореной, плоскими равнинами на месте приледниковых озер и волнистыми равнинами на флювиогляциальных отложениях. Морены и озерные отложения перекрыты легкосуглинистыми или супесчаными сильно пылеватыми покровными отложениями со средними мощностями 40–80 см. Климат территории умеренно континентальный, в среднем, с избыточным уровнем увлажнения. Для моренных гряд характерны широколиственно-еловые леса и их производные на дерново-палевоподзолистых, иногда глееватых почвах, для озерных и флювиогляциальных рав-

нин — бореальные еловые леса на дерново- и торфяно-подзолистых глееватых и глеевых почвах. Верхние части склонов моренных гряд в вогнутых позициях рельефа заняты верховыми открытыми и сосновыми болотами на торфяных залежах. На пологих склонах моренных гряд и в отдельных понижениях озерных равнин развиты лесные болота на торфяных почвах. На озерных отложениях в составе древесного полога единично или небольшими группами встречаются сосны. Естественными факторами динамики растительного покрова являются ветровалы, охватывающие большие площади. Последний массовый ветровал для рассматриваемой территории произошел в 1996 г. Локальные выпадения отдельных крупных деревьев, а также их групп, открывающие окна в полог с линейными размерами от 10 до 100 м, происходят постоянно. Следы более ранних массовых ветровалов достаточно типичны.

Для исследования были выбраны одни из основных легко измеряемых в поле характеристик почвенного профиля — гранулометрический состав (грансостав) и цвет (Soil Taxonomy, 1999). Грансостав почвы определяет ее водный и воздушный режимы, а также процессы, происходящие в почвенном профиле (Field Book for Describing and Sampling Soils, 2002, Field manual for describing terrestrial ecosystems, 2010, McKenzie *et al.*, 2008). Цвет почвы отражает основные процессы физико-химического перераспределения по профилю органического углерода, железа и его форм и др. (Konen *et al.*, 2003; Moritsuka *et al.*, 2014; Shum, L.M. Lavkulich, 1999; Viscarra Rossel *et al.*, 2005; Viscarra Rossel, Fouada, 2008; Wills *et al.*, 2007).

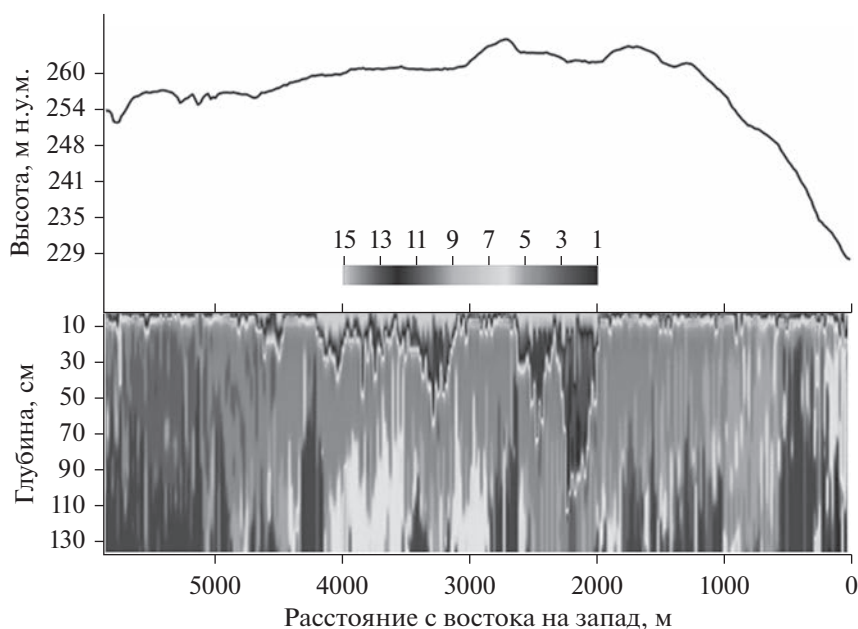


Рис. 2. Рельеф и грансостав по точкам трансекта (обозначения легенды см. в тексте).

Непосредственные измерения характеристик почвы проводились на трансекте с регулярным шагом опробования 20 м и длиной 5900 м (рис. 2), пересекающем водораздел с запада на восток. В рамках трансекта высоты рельефа меняются от 230 м над ур.м. в его восточной части, приуроченной к долине реки Межи, до 265 м в его центральной части. Центральная часть трансекта представлена преимущественно еловыми лесами с отдельными массивами сосновых лесов по заболоченным западинам. Западная и особенно восточная части трансекта пострадали от последнего массового ветровала. В результате здесь преобладают леса с доминированием березы и осины, а также встречаются небольшие участки липовых и кленовых лесов. Для исследуемой территории (кроме края восточной части трансекта) отсутствуют свидетельства антропогенного воздействия (рубки, с/х), что позволяет исследовать экосистемы в их естественном состоянии.

Характеристики почвы измерены для глубин 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20...135 см (31 слой) с помощью почвенного бура Eijkelkamp. Таким образом, в анализе используется 124 переменных, описывающих рассматриваемые характеристики почвы. Определение грансостава проводилась перцепци-

онно (Thien, 1979), цвета — по шкале Манселла. Для грансостава выделено 14 градаций (1 — глина, суглинок: 2 — тяжелый, 3 — средний, 4 — легкий, 5 — супесь, песок: 6 — мелко, 7 — средне, 8 — крупно и 9 — разноразмерный, торф: 10 — слабо, 11 — средне и 12 — сильно разложившийся, 13 — гумус, 14 — минерализованная подстилка); для оттенка цвета (Hue) — 10 градаций (1-5YR, 2-7.5YR, 3-10YR, 4-2.5Y, 5-10Y, 6-5GY, 7-10GY, 8-5G, 9-5BG, 10-5B); для яркости цвета (Value) — 8 градаций (1-2, 2-2.5, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6, 7-7, 8-8); для насыщенности цвета (Chroma) — 6 градаций (1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-6, 6-8). Отсутствие цвета для горизонта минерализованной подстилки и очень слабо разложившегося торфа обозначено нулевым значением.

Гиперспектральные данные представлены снимками со спутника EO-1 с прибором “Гиперион” (Jay, 2003), содержащими 220 каналов исходной съемки. Ширина каждого спектрального канала 10 нм. Непрерывная полоса измеряемого отраженного солнечного спектра от 400 до 2500 нм. Пространственная разрешающая способность составляет 30 м. Отобраны безоблачные снимки, полученные в период с 2012–2015 гг. за следующие дни от начала года:

- 1) 14 — 14 января 2014 года (EO1H1810212014014110T2_MTL_L1T),
- 2) 66 — 7 марта 2015 года (EO1H1810212015066110T2_MTL_L1T),
- 3) 107 — 17 апреля 2013 года (EO1H1810212013107110T2_MTL_L1T),
- 4) 120 — 30 апреля 2015 года (EO1H1810212015120110T2_MTL_L1T),
- 5) 136 — 16 мая 2013 года (EO1H1810212013136110T2_MTL_L1T),
- 6) 145 — 24 мая 2012 года EO1H1810212012145110T4_MTL_L1T,

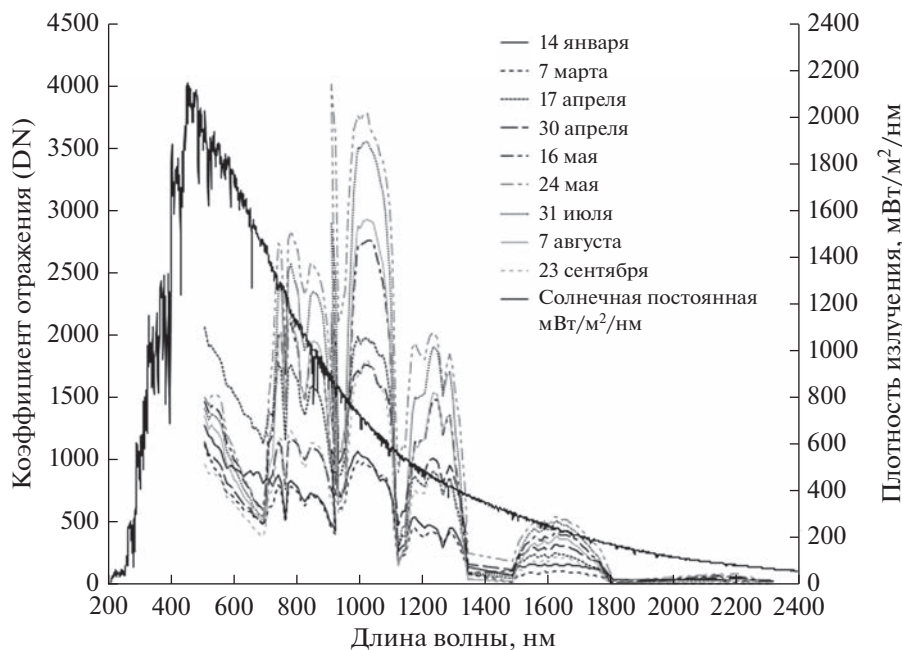


Рис. 3. Отражение солнечной радиации по всем срокам и каналам.

- 7) **213** — 31 июля 2012 года (EO1H1810212012213110T4_MTL_L1T),
 8) **219** — 7 августа 2014 года (EO1H1810212014219110T2_MTL_L1),
 9) **266** — 23 сентября 2015 года (EO1H1810212015266110T4_MTL_L1T).

Предварительный анализ каналов снимков показал, что значительная их часть не содержит информации или содержит большую долю дефектов, особенно в краевых частях снимка. В результате выделены 137 каналов (508–2315 нм), не содержащих явных дефектов. Таким образом, всего в анализе используется 1233 канала за девять сроков съемки.

Оценка качества геопозиционирования снимков показала, что смещения относительно снимка Landsat 8 (LC81820212014100LGN00, верифицированная геометрическая среднеквадратическая ошибка привязки — 3.2 м) составляют от 20 м в центре, увеличиваясь до 100 м к краям снимков, являясь индивидуальными для каждого из них. Для улучшения геопозиционирования снимков проведена геометрическая коррекция каждого из них методом локальных линейных полиномов на основе базовых точек, полученных по снимку Landsat, и достигнута приемлемая точность позиционирования с невязкой не более 15 м.

На рис. 3 показано отражение солнечной радиации по всем срокам наблюдения для всех каналов в сравнении с солнечной постоянной. Здесь наглядно отображается перераспределение энергии входе прохождения солнечного излучения через атмосферу Земли и преобразования ее ландшафтным покровом и, в первую очередь,

растительностью, создающей область поглощения спектра в видимом диапазоне длин волн и отражения в ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной частях спектра. Отчетливо проявляется сезонный ход отражения, не смотря на разные годы съемки. Исключением является апрель из-за межгодовых различий в сроках наступления снеготаяния.

Большой объем данных по каждому сроку наблюдений определяет на первом этапе использование простейшего метода статистического анализа — однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). В нем рассчитывается критерий Фишера (F-критерий) для каждого слоя характеристики почвы, представленной в дискретном виде, от всех каналов и сроков съемки. Чем больше значение критерия, тем больше информации о свойстве почвы содержится в соответствующем канале и сроке его съемки. Рассматривая F-критерии отдельно по слоям почвы, по срокам наблюдения и по спектральным каналам для всех исследуемых характеристик почвы, получаем обобщенное представление об информативности в отображении свойств почвы по данным переменным и о вкладе в нее каждого почвенного слоя для каждой переменной. Детализация этих отношений приводится в трехмерных рисунках для наиболее информативных сроков наблюдения, отражающих

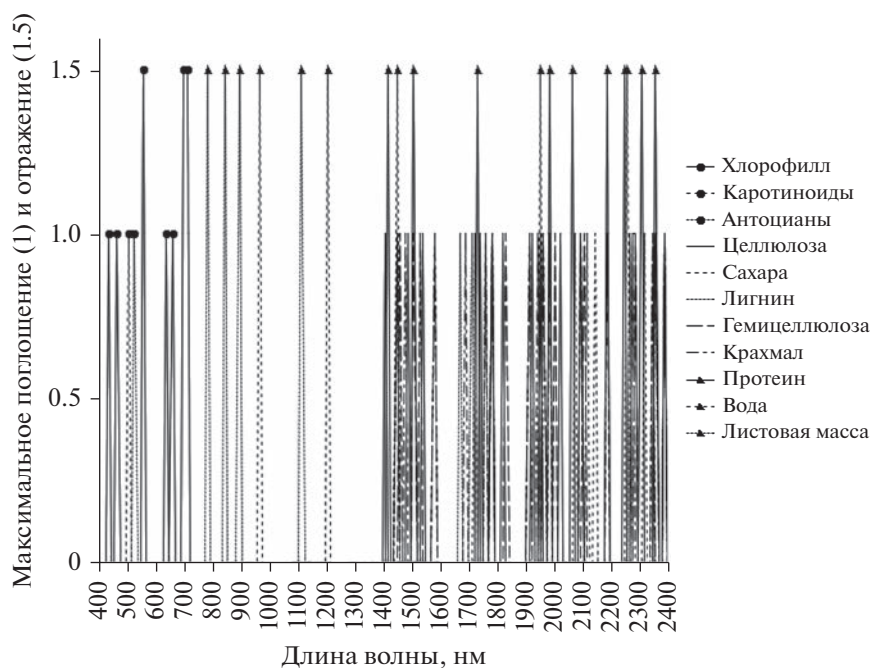


Рис. 4. Диапазоны спектра с максимальным поглощением и отражением компонентами листьев солнечной радиации.

зависимость F-критерия от полосы частот и глубины слоя. Для того чтобы показать характер связи между состояниями свойств почвы и отражением в наиболее связанных с ними каналах для наиболее информативных сроков используем средние значения отражения и стандартные ошибки. Так как каждый спектральный канал связан с содержанием различных пигментов, крахмала, сахаров и целлюлозы (рис. 4), то получаем некоторые основания для определения физического смысла наблюдаемых отношений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наибольшие значения F-критерия для грансостава (рис. 5) отмечаются на глубинах 7–15 см (максимум 15 см), 45, 75 и 120 см; для оттенка цвета — 3–10 см (максимум 4 см) и 95–135 см (максимум 120 см); для яркости цвета — 7–15 см (максимум 7 см), 25–30 см (максимум 30 см) и 65–70 см (максимум 65 см); для насыщенности цвета — 7–10 см (максимум 7 см), 40–50 см (максимум 45 см), 75 и 100 см. В результате, у каждой характеристики почвы выделяются собственные глубины с максимальной связью с ГДДЗ при наличии общих глубин для некоторых из характеристик. Высокие значения F-критерия для глубин 7–10 см характерны для всех свойств почвы. Для глубин 15, 45, 75 и 120 см отмечаются высокие значения F-критерия для двух из характеристик почв. Исходя из максимальных значений F-критерия, минимальный уровень связи с ГДДЗ у оттенка почвы. Детальный анализ связи ГДДЗ и

рассматриваемых характеристик почвы проводится для глубин, показавших наибольшие значения F-критерия.

Для грансостава (рис. 6) средний и суммарный F-критерий наибольший для 145-ого дня при максимальном значении F-критерия для 136-ого дня. В целом высокие значения связи грансостава и ГДДЗ характерны со 120-ого по 219-ый дни года. Все оценки F-критерия для оттенка цвета наибольшие для 145 дня при высокой связи этой характеристики с ГДДЗ за 213 и 14 дни. Яркость цвета имеет наибольшую связь со 145 днем, а также с 213, 219 и 107 днями. Насыщенность цвета наиболее связана со 145 днем, а также с 213 днем.

В результате, гиперспектральные данные за 145 день имеют наибольшую связь со всеми характеристиками почвы, в меньшей степени с ними связан 213 день. Наименьшие связи с характеристиками почв демонстрируют 266 и 66 дни года.

Таким образом, наибольшая информация о состоянии рассматриваемых характеристик почвы через отражение солнечной радиации от ландшафтного покрова может быть получена с конца весны по начало августа.

Грансостав почвы наиболее связан с длинами волн 579–702 и 529 нм (рис. 7). Остальные длины волн имеют намного меньшие уровни связи при минимуме для 2143–2315 нм. Оттенок цвета наиболее связан с диапазоном длин волн 641–691 нм, при относительно высокой связи со всем рассматриваемым спектром длин волн, за исключением диапазона 2143–2315 нм. Яркость цвета поч-

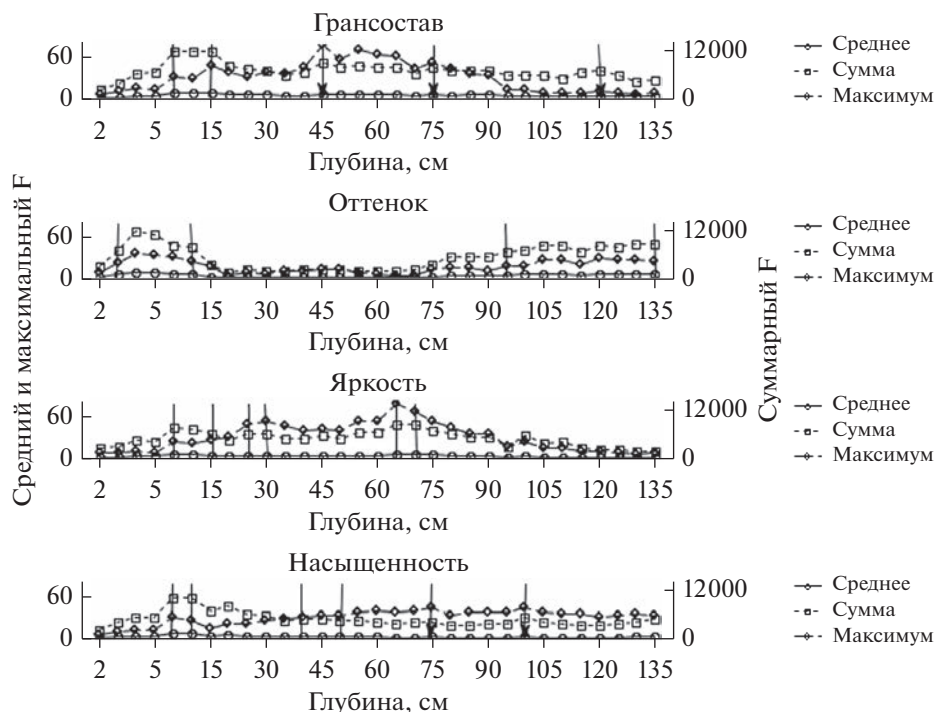


Рис. 5. Среднее, суммарное и максимальное значение F-критерия для характеристик почвы по глубинам.

вы наиболее связана с диапазонами 569–702 и 518–539 нм, тогда как для остальных длин волн связь значительно ниже. Насыщенность цвета наиболее связана с диапазоном 569–702 и 508–529 нм при наименьшей связи для длин волн 2143–2315 нм.

Таким образом, наибольшая связь для всех характеристик почв отмечается с диапазоном длин волн 641–691 нм, а также 529 нм. Для остальной части рассматриваемого спектра длин волн отмечаются связи только с некоторыми характеристиками при более низких значениях F-критерия в целом с минимумом для диапазона 2143–2315 нм. Для оттенка цвета отмечается отсутствие выраженного максимума связи с диапазоном 641–691 нм при наименьшем уровне связи из всех рассматриваемых характеристик почвы.

Более детальную картину связи значений характеристик почвы для различных глубин и каналов гиперспектральной съемки можно получить для наиболее связанного со всеми характеристиками срока измерений. В нашем случае таким сроком является 24 мая (145 день) 2012 г.

Для грансостава (рис. 8) получено, что максимальные значения F-критерия характерны для глубин 5–95 см при наибольшей связи с интервалом длин волн 580–690 нм с максимумом на **680** нм. Для глубин 5–20 см так же высокий уровень F-критерия отмечается в диапазонах 710–1420 нм при максимуме на **1120**, 1500–1790 и 2150–2260 нм при максимумах **1740** и **2160** нм соответственно. Для глубины 120 см выделяется относи-

тельно повышенная область значений F-критерия практически во всем рассматриваемом диапазоне длин волн с максимумом при **1145** и **1510** нм.

Для оттенка цвета выделяется две группы глубин с высокими значениями F-критерия: 1) 4–15 см при высокой связи с диапазонами длин волн 590–690 нм при максимуме **680**, 720–1420 нм с максимумами на **920** и **1145**, 1520–1800 нм с максимумом на **1780** и 2150–2260 нм при максимуме на **2160** нм; 2) 95–135 см при наибольшей связи с диапазонами длин волн 650–690 нм с максимумом на **670**, 720–1420 нм с максимумом на **1115** нм и 1520–1800 нм.

Яркость цвета имеет наибольшие значения F-критерия для глубин 7–105 см для диапазона 580–690 нм с максимумом при **670** нм. Также для глубин 7–20 см высокие значения F-критерия отмечаются для диапазонов 720–1420 нм с максимумом при **920** и **1115** и 1520–1800 нм.

Насыщенность цвета имеет высокие связи с ГДДЗ практически для всего диапазона глубин, за исключением самого верха профиля. На глубинах 7–25 см наибольшие связи отмечаются для диапазонов длин волн 620–690 нм при максимуме на **680**, 750–1350 нм при максимумах на **930** и **1115** и 1600–1790 нм при максимуме на **1740** нм. Для остальных глубин наибольшие F-критерии соответствуют области 590–690 нм при максимуме **670** нм.

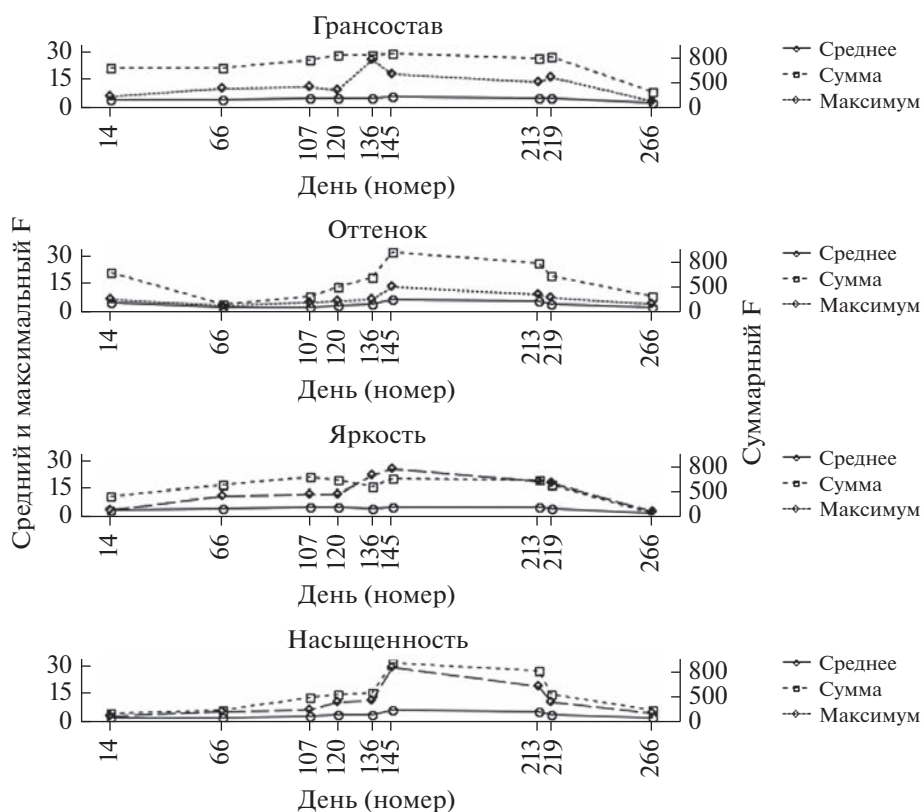


Рис. 6. Среднее, суммарное и максимальное значение F-критерия для характеристик почвы по дням года.

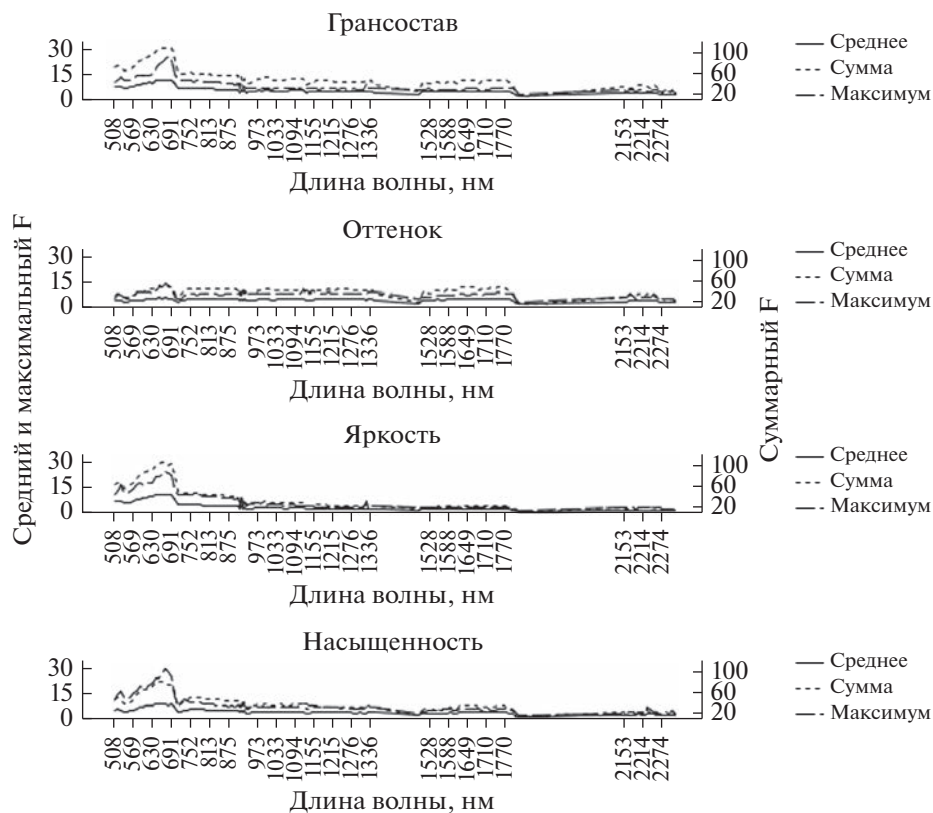


Рис. 7. Среднее, суммарное и максимальное значение F-критерия для характеристик почвы по длинам волн.

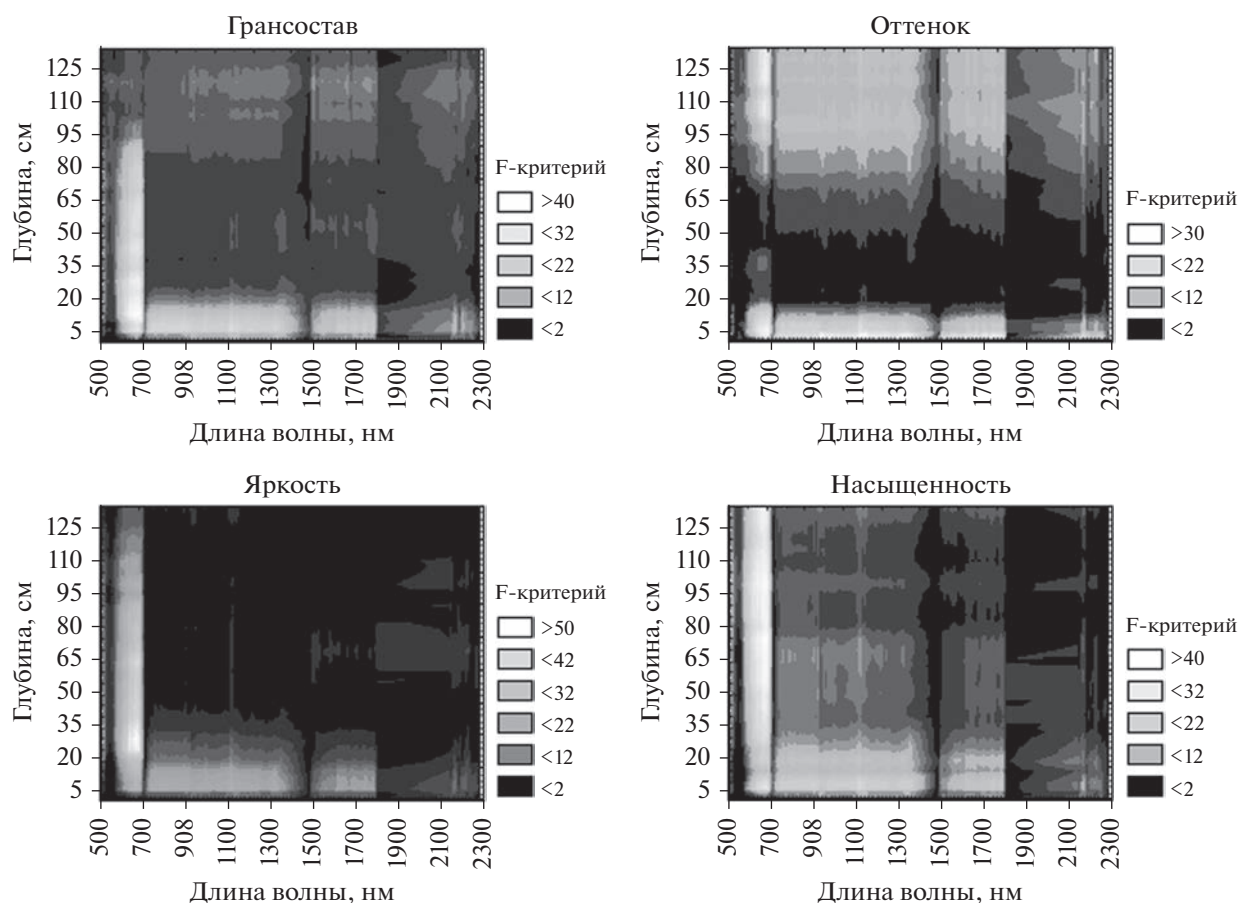


Рис. 8. Значения F-критерия для характеристик почвы по глубинам и длинам волн за 24 мая 2012 года.

Таким образом, получено, что для рассматриваемого срока съемки связи характеристик почвы с каналами гиперспектральной съемки значительно различаются, выделяя различные глубины с максимальными связями для различных характеристик. При этом области спектра, наиболее связанные с характеристиками почвы, в основном являются общими с наибольшими значениями в красном, ближнем и начале коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра для глубин до 20 см и с максимумом в красной области спектра для средней и нижних частей профиля почвы. Каналы гиперспектральной съемки, показавшие наибольшие связи с характеристиками почв, чувствительны к поглощению хлорофиллом, целлюлозой, гемицеллюлозой, сахарами и крахмалом и отражению листовой фитомассой, водой и протеинами. В результате, изменение содержания в растительности этих компонентов отражает некоторые аспекты варьирования рассматриваемых характеристик почвы.

Для отражения характера взаимосвязи измеряемых характеристик почвы и ГДДЗ проводится построение графиков средних значений и стандартных ошибок наиболее информативных кана-

лов съемки за 24 мая (145 день) 2012 для глубин, имеющих наибольшие с ними уровни связи.

Для грансостава на глубине 15 см (рис. 9) характерно уменьшение отражения для органогенных горизонтов для всех рассматриваемых каналов, кроме канала с длиной волны 680 нм, для которого отражение увеличивается. Таким образом, при наличии органогенных отложений на глубине 15 см уменьшается листовая масса со снижением содержания хлорофилла, целлюлозы и сахаров. Для глубин 45 и 75 см характерно высокое отражение для органогенных отложений в канале поглощения хлорофилла, что показывает его снижение при наличии таких отложений для этих глубин. Для глубины 120 см характерно высокое отражение в канале поглощения гемицеллюлозой, отражения протеинами и канале отражения листовой массой для средних суглинков и среднезернистых песков при наибольшем поглощении для мелко- и разномзернистых песков и глины. Таким образом, наибольшая листовая масса растительности при высоком содержании протеинов и низком гемицеллюлозы характерна при средне-суглинистых и среднезернистых песчаных отложениях в нижней части профиля. Тогда как, для

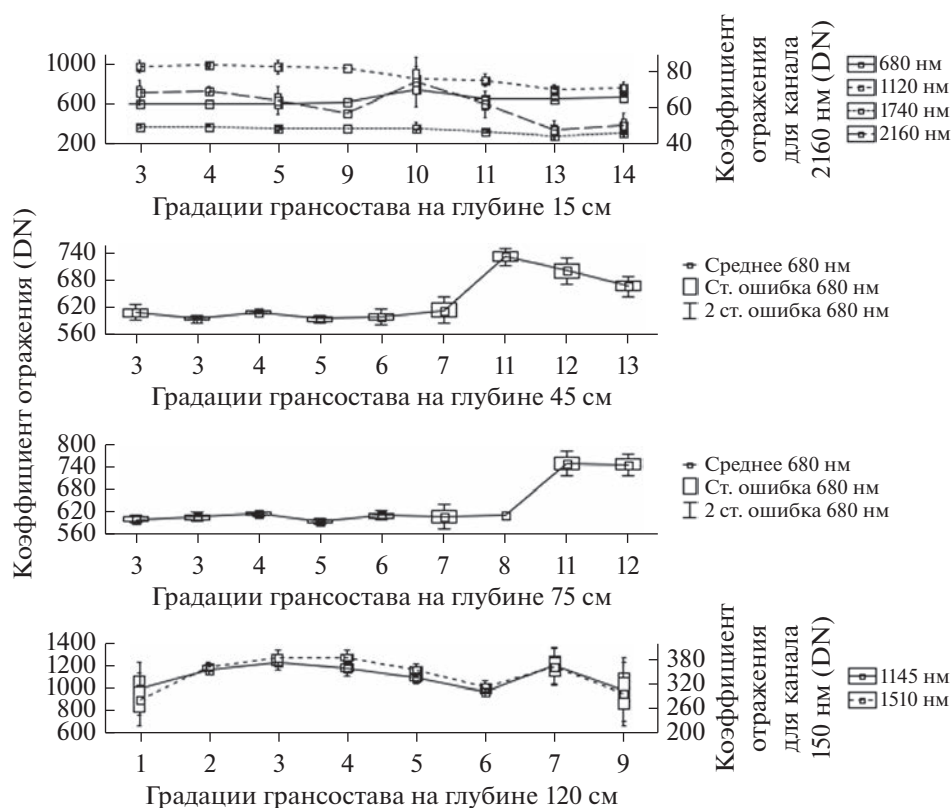


Рис. 9. Среднее, ст. ошибка (боксы) и 2 ст. ошибки (усы) для градаций грансостава по наиболее связанным глубинам и каналам гиперспектральной съемки за 24 мая 2012 года.

глин и мелко- и разнотернистых песков характерно уменьшение листовой массы и протеинов при увеличении содержания гемицеллюлозы.

Оттенок цвета на глубине 4 см (рис. 10) имеет значимые связи с большим числом каналов при наличии двух градаций цвета с большим и меньшим соотношением красного и желтого цветов и его отсутствием. Для всех рассматриваемых каналов характерно падение отражения при уменьшении доли красного цвета, кроме канала 680 нм, для которого характерно его увеличение. Таким образом, при увеличении доли желтого в цвете почвы на глубине 4 см происходит падение листовой массы, содержания хлорофилла и протеинов при росте содержания целлюлозы, гемицеллюлозы, сахаров и воды. Подобным образом реагирует отражение в рассматриваемых каналах и при наличии на глубине 4 см минерализованного подстилочного горизонта. На глубине 120 см с ростом градации оттенка цвета происходит увеличение отражения в канале поглощения хлорофиллом при увеличении поглощения в канале отражения листовой массой. В результате, смещение оттенка цвета почвы на глубине 120 см в зелено-голубые тона приводит к падению листовой массы и содержанию в ней хлорофилла.

С ростом яркости цвета почвы на глубине 7 см (рис. 11) происходит уменьшение отражения в канале поглощения хлорофиллом при росте отражения в остальных каналах. Таким образом, с ростом яркости цвета почвы происходит увеличение листовой массы, содержания хлорофилла и воды. Для глубин 30 и 65 см характерно общее падение отражения в канале поглощения хлорофиллом с увеличением яркости цвета почвы.

С увеличением насыщенности цвета почвы на глубине 7 см (рис. 12) происходит падение отражения в канале поглощения хлорофиллом на фоне роста отражения для остальных рассматриваемых каналов. Таким образом, с ростом насыщенности цвета почвы увеличивается листовая масса, содержание хлорофилла, протеина и воды, а также уменьшается содержание целлюлозы и лигнинов. Для глубин 45, 75 и 100 см с ростом насыщенности цвета почвы уменьшается отражение в канале поглощения хлорофиллом.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного анализа для рассматриваемых характеристик почвы выделены глубины, а для ГДДЗ дни года и диапазоны длин

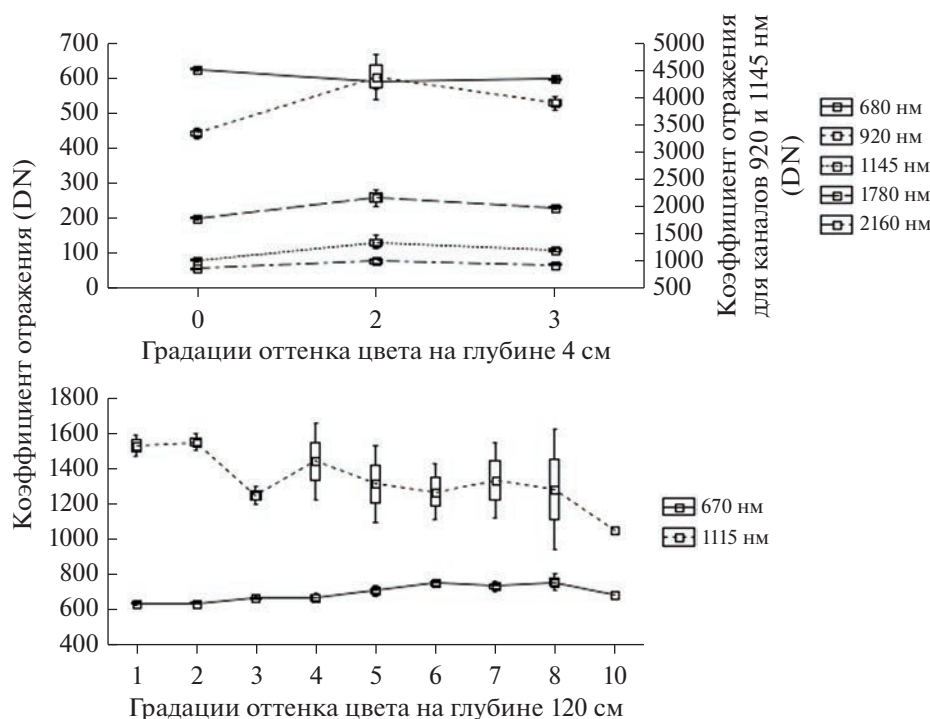


Рис. 10. Среднее, ст. ошибка (боксы) и 2 ст. ошибки (усы) для градаций оттенка цвета по наиболее связанным глубинам и каналам гиперспектральной съемки за 24 мая 2012 года.

волн, имеющие наибольший уровень совместной связи.

Наибольший уровень связи для большинства рассматриваемых характеристик почвы с ГДДЗ отмечается для глубин 7–10 см, что совпадает с интервалом глубин с максимальным развитием корневой массы древостоя и переходом между органоаккумулятивным и элювиальным горизонтами. Для яркости цвета максимальный уровень связи соответствует глубинам 65–75 см, что соотносится с граничной областью между иллювиальным горизонтом и почвообразующей породой, а также к глубинам 25–30 см, относящимся к области развития переходного горизонта между элювиальным и иллювиальным. Для большинства характеристик, кроме оттенка цвета, так же отмечается высокий уровень связи для глубины 75 см и 45 см, соответствующей развитию иллювиального горизонта. Для оттенка цвета и грансостава, и в меньшей степени насыщенности почвы выделяется диапазон глубин 95–135 см с относительно высоким уровнем связи с ГДДЗ относящийся к почвообразующей породе. Таким образом, наибольшую связь с ГДДЗ имеют глубины, в первую очередь соответствующие переходным горизонтам, а также иллювиальному горизонту и почвообразующей породе.

По срокам съемки наибольшую связь со всеми характеристиками почвы показывают ГДДЗ за середину – конец мая, при высоком уровне связи до

конца августа. Таким образом, максимальная чувствительность состояния растительности относительно рассматриваемых характеристик почв достигается в период формирования листового покрова древостоя и активного фотосинтеза хвойных пород и сфагновых болот наряду с активным развитием эфемероидов, требующих высокого освещения. К августу уровень связи характеристик почвы и растительного покрова снижается, по всей видимости, за счет набора его максимальной биомассы и снижения пространственной дифференциации. В зимний период высокую связь с ГДДЗ показывают грансостав и оттенок цвета, что выделяет мезотрофные болота с разреженным древостоем на торфяных глеевых почвах, а также леса с отсутствием или малым участием ели, обычно на дерново-слабо палевоподзолистых почвах. В результате, наибольшую связь с рассматриваемыми характеристиками почвы демонстрируют сроки съемки начала вегетации, в меньшей степени – вегетационного периода и зимы. Съемка конца сентября имеет наименьший уровень связи со всеми характеристиками почвы. Таким образом, при деградации листового и наземного растительного покрова связь растительности с состоянием почв фактически исчезает.

Каналы ГДДЗ, наиболее связанные со всеми характеристиками почвы, охватывают преимущественно красный и зеленый диапазоны электромагнитного спектра (518–691 нм). Таким обра-

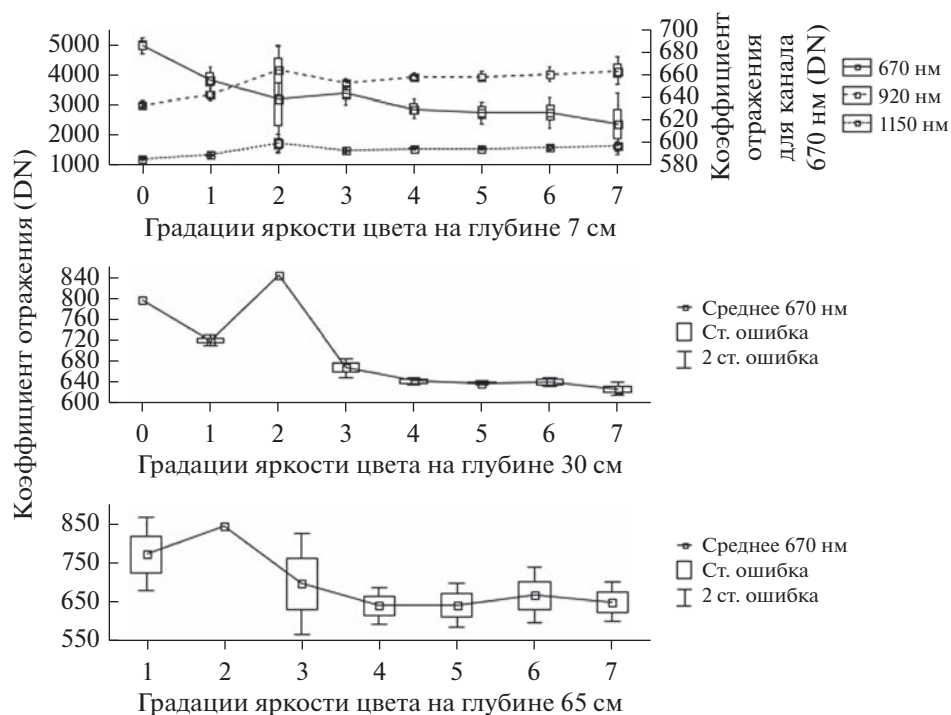


Рис. 11. Среднее, ст. ошибка (боксы) и 2 ст. ошибки (усы) для градаций яркости цвета по наиболее связанным глубинам и каналам гиперспектральной съемки за 24 мая 2012 года.

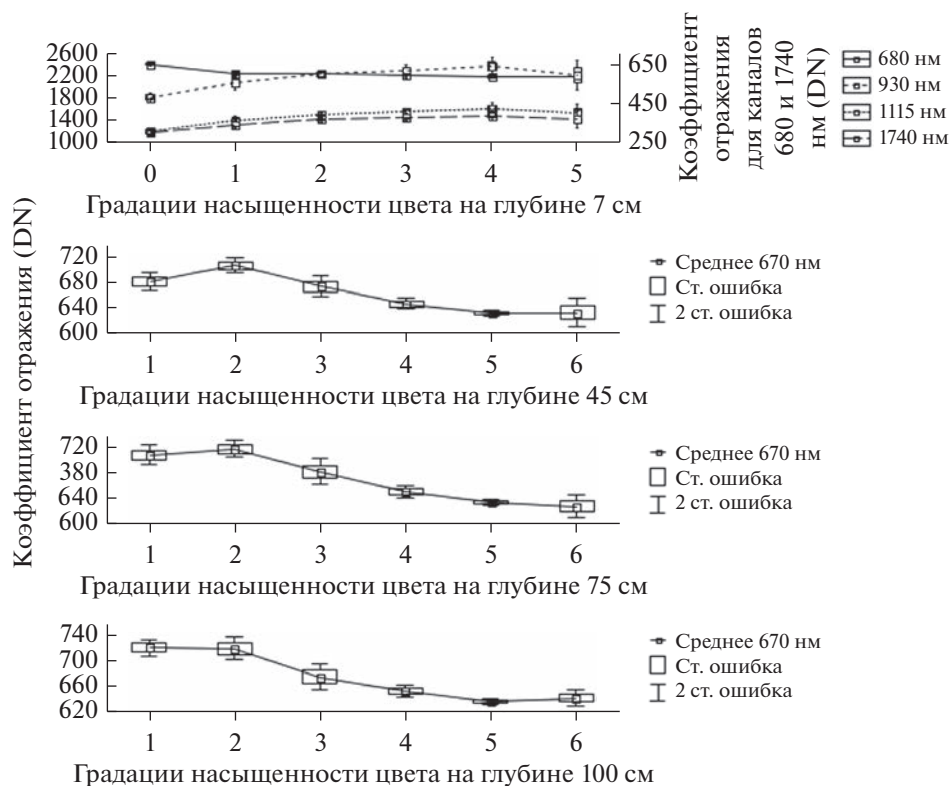


Рис. 12. Среднее, ст. ошибка (боксы) и 2 ст. ошибки (усы) для градаций насыщенности цвета по наиболее связанным глубинам и каналам гиперспектральной съемки за 24 мая 2012 года.

зом, наибольшее отражение в растительности находят рассматриваемые характеристики почвы через содержание хлорофилла, антоцианов и каротиноидов. Для грансостава и яркости цвета относительно высокий уровень связи с ГДДЗ характерен для ближней к видимому спектру области ближнего инфракрасного диапазона (700–940 нм), соответствующей области спектра отражения хлорофиллом, листовой массой и водой. Относительно высокий уровень связи ГДДЗ для интервала длин волн 1500–1800 нм отмечается для грансостава и оттенка цвета. К этому диапазону длин волн относятся области поглощения спектра целлюлозой, гемицеллюлозой, сахарами, лигнином и крахмалом и отражения протеинами. Также для этих характеристик отмечается повышенная связь с диапазоном длин волн 2150–2170 нм, относящейся к области поглощения спектра целлюлозой, гемицеллюлозой, сахарами, лигнином и крахмалом и отражения протеинами и водой. В результате, основная связь базовых характеристик почвы, т.е. ее состояния, наблюдается для диапазона длин волн, соответствующего максимальной продукционной активности растительности и, в меньшей степени, содержанию различных компонентов листа, воды и общей листовой массы.

При рассмотрении F-критериев, рассчитанных для срока съемки ГДДЗ наиболее связанного со всеми характеристиками почвы, для всех глубин и каналов, выделяются основные сочетания диапазонов глубин и длин волн: 1) 4–20 см – 580–1800 нм и 2) 580–690 нм – 4–110 см с их наибольшими значениями для всех характеристик почвы. Таким образом, получено, что состояние приповерхностного горизонта почвы связано с состоянием ландшафтного покрова в широком диапазоне отражения и поглощения основных составляющих компонентов зеленой биомассы. При этом для нижней части профиля наибольшие связи характерны для диапазона спектра с максимумом поглощения хлорофиллом.

Рассмотрение градиций характеристик почвы для наиболее связанных с ГДДЗ глубин и длин волн ГДДЗ за срок съемки, наиболее связанный со всеми характеристиками, по средним значениям и стандартным ошибкам коэффициентов отражения каналов показал, что для грансостава основная дифференциация отражения в области спектра поглощения хлорофиллом связана с наличием в средней части профиля органогенных отложений. Для верхней части профиля с наибольшей плотностью корней характерны высокие связи с несколькими каналами ГДДЗ, в рамках которых также дифференцируются минеральные и органогенные отложения через содержание воды, целлюлозы, протеинов и сахаров. В нижней части профиля наличие среднесуглинистых либо песчаных среднезернистых отложений приводит к падению содержания гемицеллюлозы и повы-

шению содержания протеинов. Таким образом, в первую очередь выделяются заболоченные позиции на торфянистых и торфяных почвах с низким содержанием хлорофилла, протеинов и высоким содержанием целлюлозы и сахаров в зеленой фитомассе.

Градации оттенка цвета в первую очередь имеют высокие связи с ГДДЗ для нижней части профиля, представленной почвообразующей породой, где с уменьшением красного и желтого оттенка в цвете и с увеличением зеленого и голубого, происходит снижение содержания хлорофилла и листовой массы, что выделяет заболоченные позиции с оглееными и глеевыми почвами.

При увеличении яркости цвета почвы в верхней части профиля происходит понижение отражения в канале поглощения хлорофиллом при росте листовой массы. Для средней части профиля также с ростом яркости цвета почвы происходит понижение отражения в канале поглощения хлорофиллом. Таким образом, увеличение яркости цвета почвы в верхней и средних частях профиля приводит к увеличению концентрации хлорофилла и листовой массы, что выделяет относительно дренированные позиции с развитием элювиального горизонта и развитой растительностью.

С ростом насыщенности цвета почвы уменьшается отражение для канала поглощения хлорофилла по всему почвенному профилю, при росте листовой фитомассы и концентрации протеинов и уменьшении концентрации целлюлозы для верхней части профиля. Таким образом, выделяются дренированные позиции с дерново-палевоподзолистыми почвами и хорошо развитой растительностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал высокий уровень связи между грансоставом, цветом почвы, с одной стороны, и гиперспектральными дистанционными измерениями с другой. В целом наибольший уровень связи демонстрирует грансостав почв и глубины, в первую очередь соответствующие переходным горизонтам, а также иллювиальному горизонту, почвообразующей породе и верхней части профиля.

Конец мая – июль являются сроками съемки, показавшими наибольшую связь с характеристиками почвы.

Наиболее связанная с характеристиками почвы область электромагнитного спектра – красная, отражающая фотосинтетическую активность растительности, а также ближняя инфракрасная, в первую очередь отражающая листовую фитомассу и содержание воды. Для отдельных глубин характеристик почвы, в основном находящихся в приповерхностном или нижнем частях профиля,

характерны связи с коротковолновыми инфракрасными каналами, что отражается через концентрацию составляющих листа таких как целлюлоза, гемицеллюлоза, протеин, сахара, лигнин и крахмал.

Большинство существующих систем спутникового зондирования Земли не имеют спектральных характеристик, сопоставимых с используемыми гиперспектральными данными. В результате наиболее близкими по характеристикам каналов, соответствующим выделенным диапазонам электромагнитного спектра с наибольшими связями между свойствами почвы и ГДДЗ, являются спутники Sentinel 2.

Ограниченность объема дистанционных данных для большей части территории не позволяет получить информацию для всего вегетационного периода в течении одного года. Однако, как показало проведенное исследование, охватывающее ГДДЗ за четыре года, сезонная изменчивость отражательной способности ландшафтного покрова намного выше, чем межгодовая, что подтверждается выраженным сезонным ходом отражения за разные годы, за исключением периода снеготаяния в апреле.

Несмотря на разномасштабность сопоставляемых в исследовании почвенных характеристик, полученных в локальной точке, и ГДДЗ, измеренных с разрешением 30 м на местности, но за счет использования трансектного метода опробований с регулярным шагом меньшим, чем пространственное разрешение снимка, и использования достаточного числа измерений, получены статистически достоверные и семантически интерпретируемые связи, показывающие, что точечные измерения почвенных характеристик для исследуемой территории репрезентативны в радиусе 10–30 м.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по теме № FMGE-2019-0007 Государственного задания Института географии РАН (в части сбора и подготовки данных) и гранта РФФИ № 22-27-00781 (в части анализа данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южно-таежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat 7) // Исследование Земли из космоса, 2006. № 4. С. 70–79.
- Asner G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance // Remote Sensing of Environment, 1998. V. 64. P. 234–253.
- Asner G.P., Martin R.E., Ford A.J., Metcalfe D.J., Liddell M.J. Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests // Ecological App. 2009. V. 19(1). P. 236–253.
- Asner G.P., Martin R.E., Knapp D.E., Tupayachi R., Anderson C., Carranza L., Martinez P., Houcheime M., Sinca, F.P. Weiss spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests // Remote Sensing of Environment, 2011. V. 115. P. 3587–3598.
- Blackburn G.A., Steele C.M. Towards the remote sensing of Matorral vegetation physiology: relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies // Remote Sensing of Environment, 1999. V. 70. P. 278–292.
- Brauns F.E., Brauns D.A. The chemistry of lignin. N.Y.: Academic Press., 1960. 703 p.
- Carter G.A., Knapp A.K. Leaf optical properties in higher plants. Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration // Am. J. Botany, 2001. V. 88(4). P. 677–684.
- Das B.S., Sarathjith M.C., Santra P., Sahoo R.N., Srivastava R., Routray A., Ray S.S. Hyperspectral remote sensing: opportunities, status and challenges for rapid soil assessment in India // Special section: hyperspectral remote sensing current science, 2015. V. 108(5). P. 860–868.
- Daughtry, C., Hunt E., McMurtrey J. Crop Residue Cover Using Shortwave Infrared Reflectance // Remote Sensing of Environment, 2004. V. 90. P. 126–134.
- DeTar W.R., Chesson J.H., Penner J.V., Ojala J.C. Detection of soil properties with airborne hyperspectral measurements of bare fields // Am. Soc. of Agricultural and Biological Engineers, 2008. V. 51(2). P. 463–470.
- Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 3.0. National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, 2012. 298 p.
- Field manual for describing terrestrial ecosystems. -2nd ed. Co-Published by Research Branch B.C. Ministry of Forests and Range, B.C. Ministry of Environment Province of British Columbia, 2010. 266 p.
- Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J. Leaf optical properties and biochemical composition // Remote Sensing of Environment, 1996. V. 56. P. 104–117.
- Gomez C., Gholizadeh A., Borůvka L., Lagacherie P. Using legacy soil data for standardizing predictions of topsoil clay content obtained from vnir/swir hyperspectral airborne images. The International Archives of the Photogrammetry // Remote Sensing and Spatial Information Sci. ISPRS Geospatial Week 2015. V. XL-3/W3. P. 439–444.
- Gmur S., Vogt D., Zabowski D., Moskal L.M. Hyperspectral Analysis of Soil Nitrogen, Carbon, Carbonate, and Organic Matter Using Regression Trees // Sensors. 2012. V. 12. P. 10639–10658.
- Hively W.D., McCarty G.W., James B. Reeves III J.B., Lang M.W., Oesterling R.A., Delwiche S.R. Use of Airborne Hyperspectral Imagery to Map Soil Properties in Tilled Agricultural Fields // Applied and Environmental Soil Science, Hindawi Publishing Corporation. 2011. V. 2011. 13 p.

- Kiang N.Y., Govindjee J.S., Blankenship R.E. Spectral signatures of photosynthesis // *Rev. of earth organisms. Astrobiology*, 2007. V. 7(1). P. 223–251.
- Konen M.E., Burras C.L., Sandor J.A. Organic Carbon, Texture, and Quantitative Color Measurement Relationships for Cultivated Soils in North Central Iowa Published // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. V. 67. P. 1823–1830.
- McKenzie N.J., Grundy M.J., Webster R., Ringrose-Voase A.J. Guidelines for surveying soil and land resources – 2nd ed. Australian Soil and Land Survey Handbook Series. Melbourne: CSIRO Publishing, 2008. 557 p.
- Moritsuka N., Matsuoka K., Katsura K., Sano S., Yanai J. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils *Soil Science and Plant Nutrition* // Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2014. V. 60. P. 475–485.
- Munsell Soil Color Charts, Revised Edition. N.Y.: Gretag-macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corp. 1994.
- Neill S., Gould K.S. Optical properties of leaves in relation to anthocyanin concentration and distribution // *Canadian J. Botany*, 1999. V. 77. P. 1777–1782.
- Jay S. Pearlman Hyperion Validation Report. Boeing Report Number 03-ANCOS-001. Phantom Works. The Boeing Company Kent, WA 98032 NASA/GSFC, 2003.
- Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys Second Edition, United States Department of Agriculture Agriculture Handbook Natural Resources Conservation Service, 1999. № 436. 886 p.
- Shum M., Lavkulich L.M. Use of sample color to estimate oxidized Fe content in mine waste rock // *Environmental Geology*, 1999. V. 37(4). P. 281–289.
- Summers D. Discriminating and mapping soil variability with hyperspectral reflectance data. Thesis presented for the degree of PhD, Faculty of Science, School of Earth and Environmental Science, The University of Adelaide, 2009. 122 p.
- Thien S.J. A flow diagram for teaching texture by feel analysis // *J. of Agronomic Education*, 1979. V. 8. P. 54–55.
- Viscarra Rossel R.A., Minasny B., Roudier P., McBratney A.B. Colour space models for soil science // *Geoderma*, 2006. V. 133. P. 320–337.
- Viscarra Rossel R.A., Fouada Y., Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents // *Biosystems engineering*, 2008. V. 100. P. 149–159.
- Wills S.A., Burras C.L., Sandor J.A. Prediction of soil organic carbon content using field and laboratory measurements of soil colour // *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 2007. V. 71(2). P. 380–388.
- Wójtowicz M., Wójtowicz A., Piekarczyk J. Application of remote sensing methods in agriculture // *Communications in Biometry and Crop Sci.* 2016. V. 11. P. 31–50.
- Luo Z., Yaolin L., Jian W., Jing W. Quantitative mapping of soil organic material using field spectrometer and hyperspectral remote sensing // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008. V. XXXVII. Part B8. P. 901–906.

Representation the Properties of the Central-Forest Reserve Southern Taiga Forest Soils in Remote Hyperspectral Measurements

M. Yu. Puzachenko^{1, #}, A. S. Baibar^{1, 2}, and Y. G. Puzachenko¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017 Russia*

²*Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Leninsky prospect, 33, Moscow, 119071 Russia*

[#]*e-mail: m.yu.puzachenko@igras.ru*

It is studied the representation of the texture and color of the soil on the Munsell scale, measured to a depth of 135 cm with an interval of 5 cm on the transect (length 6 km) with a step of 20 m, in hyperspectral data of the Hyperion instrument for 9 measurement periods from January to September. It was found that satellite image for May 24 is most closely related to all the characteristics under consideration. For the soil texture – the largest relationships are observed for depths of 7–15 cm, 45 cm, 75 cm and 120 cm; for color hue – 3–10 cm and 95–135 cm; for color value – 7–15 cm, 25–30 cm and 65–70 cm; for color chroma – 7–10 cm, 40–50 cm, 75 cm and 100 cm. The texture of soil is most related with wavelengths 579–702 nm and 529 nm, color hue – 641–691 nm, color value – 569–702 nm and 518–539 nm, color chroma – 569–702 nm, 508–529 nm and 732–763 nm.

Keywords: hyperspectral remote sensing, soil texture, Munsell soil color charts, ANOVA