

УДК 528.88:911.51

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТАЕЖНЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2020 г. И. Е. Терентьева^{a, *}, И. В. Филиппов^{b, **}, А. Ф. Сабреков^{a, b, ***},
М. В. Глаголев^{a, b, c, d, ****}, Ю. А. Курбатова^{a, *****}, Ш. Максютгов^{e, *****}

^aИнститут проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

^bЮгорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

^cМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^dИнститут лесоведения РАН, с. Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия

^eНациональный институт исследований окружающей среды, Цукуба, Япония

*e-mail: kleptsova@gmail.com

**e-mail: filip83pov@yandex.ru

***e-mail: misternickel@mail.ru

****e-mail: m_glagolev@mail.ru

*****e-mail: kurbatova.j@gmail.com

*****e-mail: shamil@nies.go.jp

Поступила в редакцию 23.03.2019 г.

После доработки 19.07.2020 г.

Принята к публикации 12.08.2020 г.

Изучение болот важно для понимания климатических процессов, поскольку данные ландшафты аккумулируют углерод и являются источником метана. Гетерогенность их пространственной структуры создает проблему при оценке баланса углерода на основании данных точечных наблюдений. Для расчетов региональной эмиссии метана создана карта болотных и аквальных ландшафтов таежной зоны Западной Сибири, использующая классификацию с обучением спутниковых снимков *Landsat*. Используются полевые данные по 28 ключевым участкам, а также снимки сверхвысокого разрешения. Классификационная схема включала шесть основных типов болотных комплексов, широко распространенных в зоне тайги. Оценка точности карты опиралась на 1082 полигона размером 10×10 пикселей; итоговое значение составило 79%. Общая площадь болот и аквальных ландшафтов тайги составила 54.5% площади Западной Сибири или 11% площади болот всего мира. Средняя заболоченность территории составляет 29%. Преобладают грядово-мочажинные (31% площади болот), грядово-мочажинно-озерковые и рямовые комплексы (по 18%); распространены мезо- и эвтрофные болота (16%) и аквальные ландшафты (11%); остальные площади заняты мерзлотными бугристыми болотами. Новая карта отражает существенные изменения в соотношении площадей комплексов, имеющих разные показатели эмиссии метана и стока диоксида углерода по сравнению с предыдущей инвентаризацией, и может быть основой для новых оценок вклада болот Западной Сибири в регуляцию глобального климата.

Ключевые слова: Западная Сибирь, болота, метан, диоксид углерода, карта болот, *Landsat*

DOI: 10.31857/S2587556620060102

ВВЕДЕНИЕ

Болота являются важнейшим компонентом цикла воды и углерода. Они покрывают около 7% земной поверхности, причем значительная часть болот располагается в северных широтах [23]. Они являются главным природным источником метана [19]. Прогнозируется, что к концу XXI в. эмиссия метана из болот увеличится, по крайней мере, в два раза вследствие потепления климата и будет содействовать его усилению [33].

Изучение эмиссии метана болотами особенно актуально в Западной Сибири (ЗС) — одном из самых заболоченных регионов не только России, но и мира. Однако недавние исследования показали, что при оценке регионального потока из болот ЗС основную неопределенность вносит используемая картографическая основа [16]. Современные пространственные данные имеют низкое разрешение и не показывают всю гетерогенность болот региона, необходимую для инвентаризации потоков парниковых газов, в том числе эмиссии мета-

на, и других экологических показателей. К примеру, точность четырех широко используемых в настоящее время картографических продуктов, имеющих глобальный охват, в случае ЗС болот достигает лишь 56% [19]. Картографические продукты, основанные на радарных данных [28], хороши для идентификации наиболее увлажненных территорий, однако они недооценивают площади широко распространенных в тайге сфагновых болот вследствие отсутствия открытых участков воды.

Помимо этого существует множество карт России и отдельных ее регионов, созданных отечественными учеными. Основные из них, а также этапы развития геоботанического картографирования в целом, подробно описаны в [15]. В частности, одной из ведущих для площадных оценок структуры растительного покрова остается Геоботаническая карта СССР [12], включающая 210 единиц растительного покрова. Также для оценок широко используется почвенная карта РСФСР [14], которая легла в основу составления единственной карты болот России [3]. Существует также множество региональных карт ЗС, к примеру, типологическая карта болот Государственного гидрологического института [11], карта растительности [4], современная карта, составленная по снимкам MODIS [1]. Множество полезных карт также представлено в [5].

Большинство отмеченных выше карт создавались еще в XX в., когда компьютерные мощности, методы дистанционных исследований и геоинформационные технологии не были доступны. Поэтому, несмотря на обширные полевые исследования, большинство созданных ранее карт обладают низким пространственным разрешением и высокой степенью генерализации. Более того, оценка точности недоступна для большинства из них, а разброс значений площадей болот одного и того же региона может быть двукратным [29]. Считаем, что использование этих карт может привести к существенной погрешности в оценке эмиссии метана болот ЗС.

Цель нашего исследования – инвентаризация и картографирование болотных ландшафтов таежной зоны ЗС на основе спутниковых снимков *Landsat* с разрешением 30 м.

В качестве объекта исследований выбрана зона тайги ЗС, имеющая высокую заболоченность. Для этого региона имеется большое количество экспериментальных данных по оценкам потоков метана разными элементами ландшафтов болот. В перспективе полученные результаты могут быть использованы в практике рационального использования территорий, верификации дистанционных данных и для валидации глобальных климатических и гидрологических моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создание типологической карты болотных ландшафтов

Типологическая карта болот была создана с помощью свободно доступных спутниковых снимков *Landsat* с разрешением 30 м. Для создания карты было выбрано 80 снимков, сделанных в пик вегетационного сезона так, чтобы в перекрывающихся частях они были максимально похожи друг на друга по состоянию растительного покрова. Задачей исследования являлась инвентаризация современного состояния болот ЗС, поэтому большая часть материалов датировалась периодом 2005–2010 гг.; лишь при отсутствии сцен за данный период допускалось дешифрирование более ранних снимков.

Процесс создания карты включал предварительную обработку снимков, задание эталонных участков, собственно картографирование, перегруппировку спектральных классов в итоговые типы болот и оценку точности карты. Чтобы минимизировать проблемы, связанные с отделением различных болотных типов друг от друга и от окружающих ландшафтов, для каждого снимка *Landsat* создавалась маска болот (т.е. снимок, из которого по большей части удалены леса, поля, города и т.д.) в *Quantum GIS v.2.01* (рис. 1). Создание маски производилось на основе эмпирически подобранных пороговых значений *Green Red Vegetation Index* [26]; для отделения водных объектов использовался ближний инфракрасный канал *Landsat* (1.560–1.660 мкм). В наиболее сложных случаях применялись снимки за различные временные периоды, тепловые каналы и другие вегетационные индексы. Слой маски отфильтровывался от шумов в пакете *MATLAB v.7.13 (Mathworks)* и поканально накладывался на исходный снимок *Landsat*.

Картографирование сцен проводилось с помощью *Multispec v.3.3 (Purdue Research Foundation)* путем классификации с обучением (метод максимального правдоподобия) на основании данных всех каналов за исключением теплового. По аналогии с [22] использовались следующие критерии выбора эталонных участков: 1) максимальная гомогенность; 2) площадь не меньше 6 пикселей при среднем значении в 100 пикселей. Тип болотного ландшафта определялся на основании доступных в *Google Earth* снимков сверхвысокого разрешения (1–3 м) различных спутников (*QuickBird, WorldView, Geo-Eye, IKONOS*), а также наземных данных с 28 ключевых участков. Помимо этого использовались вегетационные индексы, позволяющие оценить степень развитости древесного яруса, степень трофности и структуру болотного ландшафта, т.е. основные интересующие нас показатели. Для минимизации проблем, связанных с

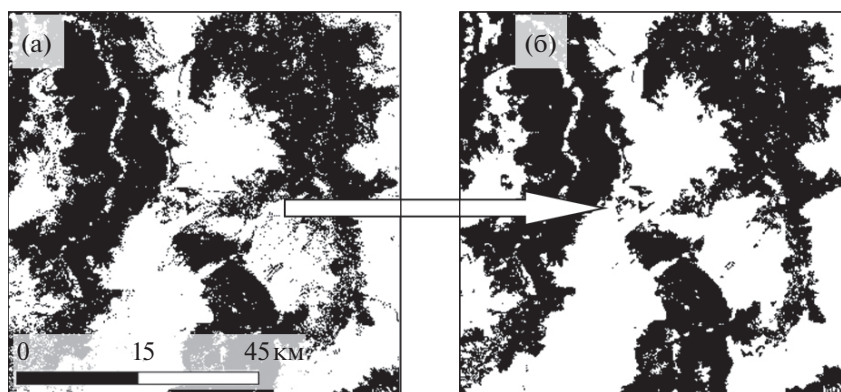


Рис. 1. Создание маски болотных ландшафтов (белый – болота): (а) до фильтрации шумов в *Matlab* и (б) после фильтрации шумов. Координаты центра участка: 56°41'22" с.ш., 82°46'22" в.д.

состыковкой снимков, часть эталонных участков задавалась в перекрывающихся частях снимков.

Обработанные снимки фильтровались от шумов в *MATLAB v. 7.13 (Mathworks)* с помощью модального фильтра с размером скользящего окна в 7 пикселей (см. рис. 1). Одновременно производилась перегруппировка спектральных классов на основании нижеописанной типологии. Объединение результатов картографирования 80 снимков и итоговые расчеты площадей проводились в модуле *GRASS Quantum GIS* (функции *r.patch* и *r.stats* соответственно). При расчетах площадей использовалась проекция Альберса.

Точность карты оценивалась двумя путями: а) визуально, чтобы выявить грубые ошибки, б) количественно, с помощью простой матрицы ошибок [17]. Во втором случае оценка точности проводилась по снимкам сверхвысокого разрешения для 1082 случайно выбранных полигонов размером 10 × 10 пикселей.

Типология болотных ландшафтов

Для создания карты болот мы использовали типологию болотных комплексов, в которую включили основные классы, напрямую картографируемые по снимкам *Landsat* и широко распространенные в ЗС. Данная типология опирается на исследования отечественных болотоведов [6, 7, 9, 10, 13]:

1. *Грядово-мочажинные комплексы (ГМК)* – верховые болота, образованные сосново-кустарничково-сфагновыми грядами и открытыми олиготрофными мочажинами.

2. *Рямы* – типичные для таежной зоны ЗС сосново-кустарничково-сфагновые верховые болота с выпуклой поверхностью. Уровень болотных вод (УБВ) обычно находится на несколько дециметров ниже поверхности мохового покрова.

3. *Грядово-мочажинно-озерковые комплексы (ГМОК)* – верховые болота, представляющие со-

бой сочетание гряд, мочажин и обводненных мочажин (в том числе небольших озер). Формируются на наиболее плоских и слабодренлируемых участках болотных систем.

4. *Мезо- и эвтрофные болота* – интегральный класс, включающий все разнообразие открытых переходных и низинных болот. Формируется в местах повышенной доступности элементов минерального питания – в периферийных частях болотных массивов, у минеральных островов и вдоль болотных водотоков. В данный класс входят также веретьевые комплексы (Западно-Сибирские аналоги аапа-болот [8]), эвтрофные лесные болота, а также открытые мезо- и эвтрофные болота.

5. *Озера и реки* – любые водные объекты, выделяющиеся на снимках разрешения *Landsat* (больше 60 × 60 м²).

6. *Бугристые комплексы* – верховые и переходные мерзлотные болота, представляющие собой сочетание мерзлых торфяных бугров с олиго- и мезотрофными мочажинами [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типологическая карта болот таежной зоны ЗС

Для пространственной экстраполяции точечных данных по эмиссии CH_4 и получения ее новой региональной оценки была разработана типологическая карта болот таежной зоны ЗС (рис. 2). По ней мы оценили площадь болотных и аквальных ландшафтов региона исследования – 54.5 Мга (площадь болотных экосистем без учета водных экосистем составляет 48.3 Мга).

В глобальных оценках площади болот на планете [29] можно встретить почти 10-кратную разницу в минимальных и максимальных показателях. Минимальные оценки часто связаны с неспецифичностью карт, т.е. идентификация болот

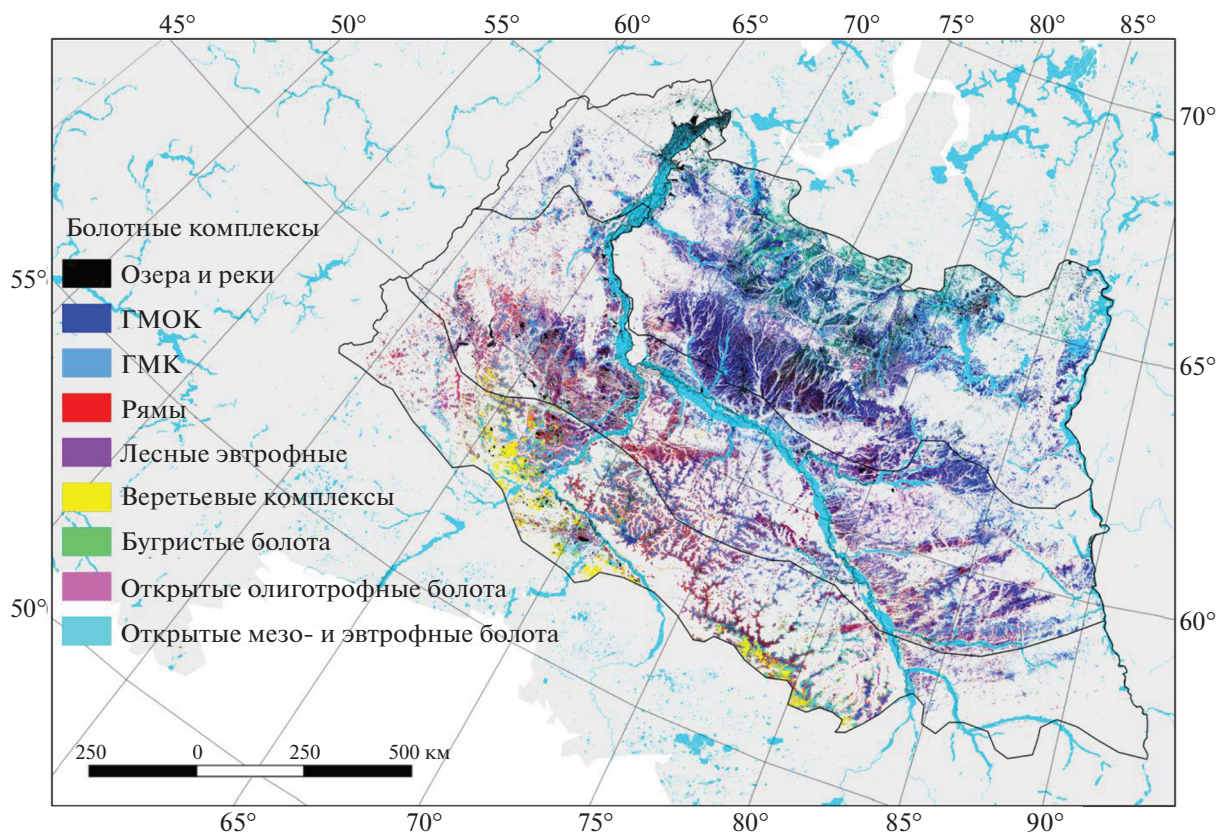


Рис. 2. Новая карта болотных ландшафтов таежной зоны ЗС. Класс мезо- и эвтрофные болота разделен на подклассы: веретьевые комплексы (аналог аапа-болот), эвтрофные лесные болота и открытые болота.

не являлась основной целью работы. Максимальная оценка принадлежит [29].

Площади болот таежной зоны ЗС по нашим оценкам составляют 507 Мга – около 11% от площади болот Земли. Для сравнения можно сказать, что полученная величина больше площадей болот Китая и превышает площади болот всей тропической зоны (43.9 Мга) [27], низменностей Гудзона Залива и Аляски (составляющих 32.4 и 32.41 Мга соответственно) [18, 25, 32].

Сравнение результатов с данными предыдущих инвентаризаций болот ЗС

Новые данные по площади болот оказались близки к некоторым предыдущим оценкам. В частности, в работе [3] площади болот ЗС были оценены в 58.3 Мга, что лишь немногим больше нашей оценки. К сожалению, неизвестно, включает ли данная величина площадь аквальных ландшафтов; если нет, то эти оценки будут еще ближе. Карта болот *WSLPD* [29] также дает оценку площади, близкую к нашей.

Самое близкое значение площади болот ЗС было получено по карте Государственного гидрологического института (ГГИ) [11] и оцифрован-

ной [28]. Авторы полагают, что полученная ими величина может быть несколько ниже реальной, что особенно удивительно, поскольку новая карта никоим образом не опирается на материалы, использованные при создании карты ГГИ. Но близость оценок не дает оснований говорить об учете “истинного” пространственного распределения болот ЗС, что хорошо видно на сравнении двух карт (рис. 3).

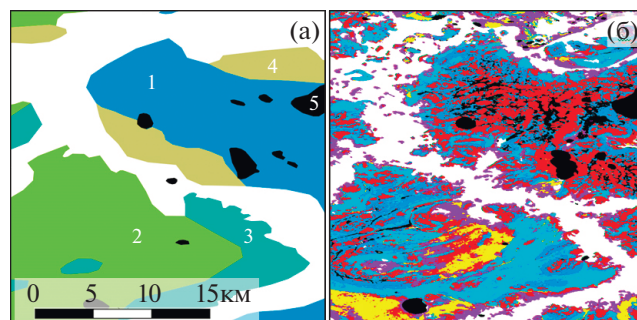


Рис. 3. Сравнение результатов классификации болот: (а) карта ГГИ (1 – болотно-озерные комплексы, 2 – ГМК и ГМОК, 3 – лесные и мохово-лесные, 4 – рямы, 5 – озера); (б) новая карта (легенда – см. рис. 2). Координаты центра участка: 59°16'31" с.ш., 66°47'01" в.д.

Остановимся подробнее на сравнении разработанной нами новой типологической карты болот с картой ГГИ, поскольку благодаря [28] последняя долгое время являлась единственным продуктом в открытом доступе и обладает детальной классификационной схемой. Это позволяло проводить экстраполяцию потоков метана в региональном масштабе.

Главной причиной различий двух карт являются методики их создания. Как известно, карта ГГИ была разработана по материалам аэрофотосъемки, дополненным масштабными полевыми исследованиями и топографической съемкой. Известно, что использование аэрофотоснимков в качестве основы для картографирования повышает точность карт. К примеру, за счет высокого разрешения аэросъемка позволяет проводить более точную идентификацию элементов болотных ландшафтов, имеющих высокую степень пространственной гетерогенности (ГМК, ГМОК и аналоги аапа-болот). С появлением космической съемки, некоторые исследователи в своих работах все еще отдавали предпочтение аэрофотосъемке [31]. Однако картографирование болот по аэрофотоснимкам трудоемкое, требует больше времени и поэтому подходит для детального картографирования болот, занимающих сравнительно небольшие площади. Напротив, при масштабном картографировании их применение неоправданно за счет высокой стоимости и длительности. В случае с картой ГГИ, применение аэрофотоснимков и отсутствие на тот период достаточных компьютерных мощностей привело к низкой степени детализации карт: 1) границы между болотными ландшафтами и лесами, а также между различными типами болотных экосистем сильно генерализованы; 2) небольшие болота вне крупных массивов часто не учитывались, как и суходольные участки внутри болотных систем.

В отличие от материалов аэрофотосъемки, спутниковые снимки позволяют проводить авто-

матическое картографирование ландшафтов, значительно сокращающее время создания итоговой карты. Они особенно подходят для инвентаризаций болот в странах, где материальные и трудовые ресурсы ограничены, а данные о распространенности болот и окружающих их земель недостаточны [26].

На рис. 3 представлено сравнение новой типологической карты болот и карты ГГИ для участка размером $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, расположенного в средней тайге ЗС. Видно, что инвентаризация ГГИ слишком упрощает пространственную структуру болотного комплекса и закономерности распространения экосистем внутри него. В работе [30] отмечалось, что на отдельных участках, где было представлено на карте ГГИ 3 типа болот, по спутниковым снимкам была возможность выделить 10 и более типов. Тем не менее, именно карта ГГИ позволила нам произвести первые оценки потоков, которые показали существенную роль болот ЗС в глобальном цикле углерода.

Пространственные закономерности распространения болот в тайге ЗС

Общая заболоченность таежной зоны составляет 29% и варьирует от 7% на юге до 36% на севере. Причем распространенность болот резко падает к подтайге вследствие сокращения количества осадков и увеличения интенсивности испарения (табл. 1).

Чтобы понять особенности распространения тех или иных типов болот ЗС, рассмотрим “типичный” для таежной зоны болотный массив (рис. 4) [6]. Как правило, на плоских центральных плато Западно-Сибирской низменности образуются цепочки небольших вторичных озер и/или топей, которые в сочетании с вытянутыми кустарничково-сфагновыми грядами создают грядово-мочажинно-озерковые комплексы (ГМК). На склонах массивов с лучшими условиями стока

Таблица 1. Площади различных типов болот таежной зоны ЗС

| Болотный тип | Северная тайга | | Средняя тайга | | Южная тайга | | Подтайга | |
|--------------------------|----------------|----|---------------|----|-------------|----|----------|----|
| | Мга | % | Мга | % | Мга | % | Мга | % |
| Водоемы | 3.91 | 19 | 1.66 | 9 | 0.37 | 3 | 0.24 | 12 |
| ГМК | 5.21 | 25 | 8.33 | 43 | 3.23 | 27 | 0.19 | 9 |
| ГМОК | 6.59 | 31 | 2.61 | 14 | 0.63 | 5 | 0.06 | 3 |
| Мезо- и эвтрофные болота | 1.13 | 5 | 1.60 | 8 | 4.60 | 38 | 1.31 | 62 |
| Рямы | 1.29 | 6 | 5.05 | 26 | 3.21 | 27 | 0.31 | 15 |
| Бугристые болота | 2.94 | 14 | | | | | | |
| Итого | 21.08 | | 19.24 | | 12.04 | | 2.11 | |
| Площадь | 58.46 | | 56.56 | | 42.96 | | 28.21 | |
| Заболоченность, % | 36 | | 34 | | 28 | | 7 | |

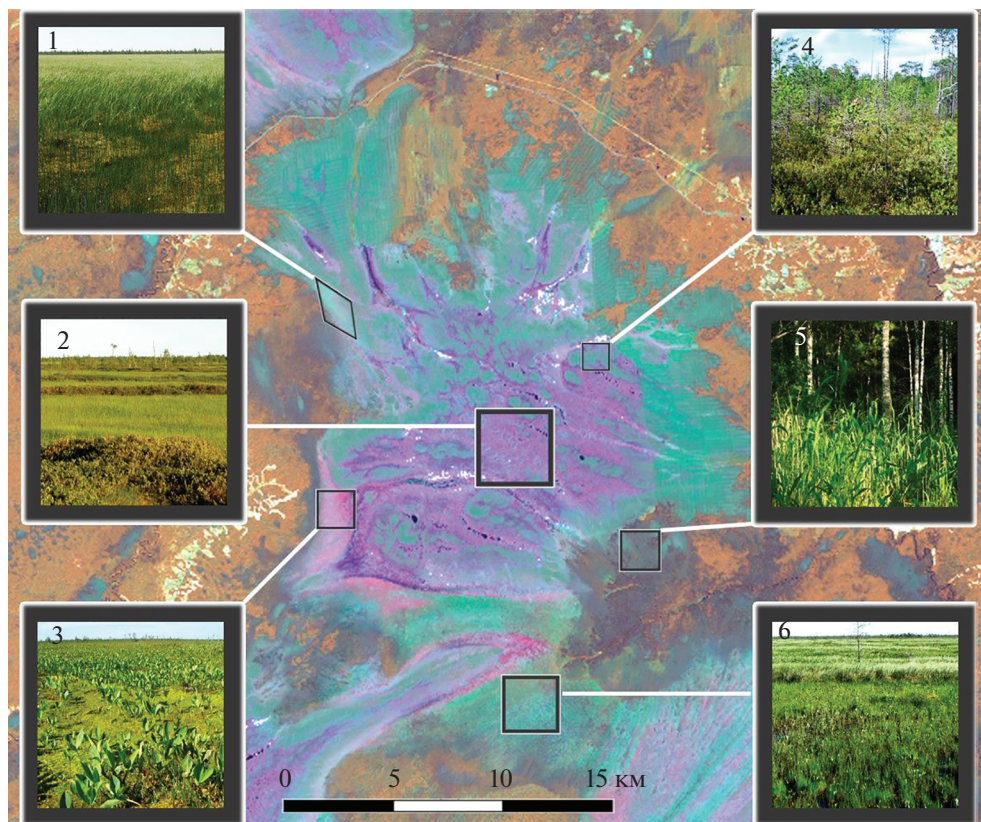


Рис. 4. Типичные болотные комплексы таежной зоны ЗС, ключевой участок “Плотниково” (1 – мезотрофные болота с *Carex rostrata*, 2 – ГМК, 3 – мезотрофные болота с *Menyanthes trifoliata*, 4 – рямы, 5 – заболоченные леса, 6 – веретьевые комплексы с *C. lasiocarpa*). Координаты центра участка: 56°47'39" с.ш., 82°47'02" в.д.

сосредоточены менее обводненные ГМК с олиготрофными сфагново-шейхцериевыми мочажинами. В работе [10] указывается, что соотношение площадей гряд, мочажин и озерков зависит от уклона поверхности – чем он меньше, тем большая площадь занята мочажинами. На периферии массивов и других участках хорошего естественного дренажа расположены многочисленные рямовые комплексы. Они также преобладают вокруг озер. По окраинам больших олиготрофных массивов на границе с минеральной почвой, а также в местах локальных выходов богатых грунтовых вод широко распространены мезо- и эвтрофные осоковые и осоково-гипновые болота. Из центральных частей больших олиготрофных массивов вода стекает по болотным водотокам, растительность которых становится более эвтрофной при приближении к границе с лесом.

Описанные выше “типичные” болотные массивы наиболее характерны для средней тайги ЗС: ГМК доминируют – 43% болот, рямы – 26% и ГМОК – 14% (см. табл. 1). Небольшие площади занимают также водные объекты (9%) и мезо- и эвтрофные болота (8%).

В северной тайге за счет большего количества осадков и меньшей испаряемости, существенно возрастает площадь обводненных болот, таких как ГМОК, а также водных объектов (19 и 31% площади болот соответственно). Это хорошо видно, к примеру, на территории “Сургутского полясья” – уникального массива с огромным количеством озер и ГМОК. Напротив, площадь ГМК и рямов в северной тайге снижается до 25 и 6% соответственно, но появляются бугристые мерзлотные болота.

В южной тайге происходит обратный процесс, за счет высокой испаряемости и меньшего количества осадков, снижаются площади ГМК, ГМОК и водных объектов (27.5 и 3% соответственно). Напротив, за счет высокой минерализации грунтовых вод, предположительно, связанной с преобладанием лессовидных суглинков [2], существенно возрастает площадь мезо- и эвтрофных болот (до 38%). Более того, структура данных болот также меняется. В частности, здесь широко распространены аналоги ГМК и ГМОК с мезо- и эвтрофными мочажинами. Это так называемые веретьевые комплексы.

Таблица 2. Результаты оценки точности новой карты болот ЗС

| Реальные классы* | Неб | Оз | ГМОК | Рямы | ГМК | Фен | Вер | ЛесБ | БуБо | ОткрБол | Итого | UA**, % |
|------------------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|---------|-------|---------|
| Расчетные классы | | | | | | | | | | | | |
| Неб | 110 | | | 1 | | | | | | 2 | 113 | 97 |
| Оз | | 94 | 3 | | | | | 1 | | | 98 | 96 |
| ГМОК | 4 | 7 | 69 | 1 | 4 | | | | 2 | | 87 | 79 |
| Рям | 3 | | 1 | 108 | 7 | | 4 | | | 7 | 130 | 83 |
| ГМК | 1 | | 6 | 2 | 150 | 5 | 9 | | | 8 | 181 | 83 |
| Фен | | | 3 | 1 | 3 | 86 | 20 | | | 3 | 116 | 74 |
| Вер | 1 | | 4 | 1 | | 18 | 68 | | | | 92 | 74 |
| ЛесБ | 5 | | | | | 4 | 9 | 82 | | | 100 | 82 |
| БуБо | 13 | | 1 | 2 | 1 | | | | 54 | 3 | 74 | 73 |
| ОткрБол | | | | 1 | 7 | 1 | | | | 38 | 47 | 81 |
| Итого | 137 | 101 | 87 | 117 | 172 | 114 | 110 | 83 | 56 | 61 | 1038 | |
| РА***, % | 80 | 93 | 79 | 92 | 87 | 75 | 62 | 99 | 96 | 62 | | |

* Неб – неболотный ландшафт, Оз – озера и реки, Фен – открытые мезо- и эвтрофные болота, Вер – веретьевые комплексы (аналог аапа-болот), ЛесБ – плоские эвтрофные лесные болота, БуБо – мерзлотные бугристые болота, ОткрБол – открытые олиготрофные болота; ** точность пользователя [10]; *** точность производителя [10].

Сложности картографирования различных типов болот ЗС

При картографировании болот неизбежно возникают проблемы, связанные с отделением их различных типов друг от друга и от окружающих ландшафтов, вследствие перекрытия спектральных сигнатур [21]. Наиболее простыми классами являются аквальные ландшафты, а также ГМК и ГМОК, а наиболее сложными – разнообразные мезо- и эвтрофные болота.

В частности, открытые мезо- и эвтрофные болота с низким УБВ спектрально близки к сельскохозяйственным угодьям. Это усложняет создание карты болот юга ЗС, где пахотные земли занимают большие площади. Различные вегетационные индексы не помогают отделять болот от сельхозугодий. Хорошие результаты дал выбор снимков за весенний период, когда болота наиболее обводнены. Помимо этого, неплохие результаты показало применение теплового канала *Landsat* и использование актуальных карт сельскохозяйственных земель.

В случае идентификации лесных мезо- и эвтрофных болот их спектральные характеристики практически идентичны с лесными массивами. Вегетационные индексы (GRVI и другие) также практически бесполезны, поскольку значения индекса похожи для обоих типов объектов. Од-

ним из признаков таких болот может быть более ровная текстура на снимках, а также их положение в ландшафте. Поскольку данные методы реализованы лишь в малом количестве свободных для доступа программ, то дешифрирование этих болот до сих пор остается одной из трудно реализуемых задач.

Веретьевые болота могут быть ошибочно определены как рямы или леса. Поскольку они занимают большие площади в южной тайге и подтайге (например, Васюганские болота), нами была реализована расширенная методика дешифрирования данных болот. Для этого мы использовали снимки за три сезона – лето, весну и зиму. На первом этапе была создана маска болот с помощью зимнего снимка. Затем брался весенний снимок для отделения комплексов, наиболее обводненных в этот период. По летнему снимку картировались все остальные болотные типы.

Оценка точности карты

Итоговая точность карты была оценена с помощью простой матрицы ошибок, в которой каждая индивидуальная категория четко описывается с точки зрения ошибок комиссии [17]. Данным ошибкам соответствуют показатели точности пользователя и точности производителя, которые

варьировали от 73 до 97% и от 62 до 99% соответственно (табл. 2). Итоговая точность карты составила 79%, что является хорошим показателем для столь большого и удаленного региона.

ВЫВОДЫ

Площадь водно-болотных ландшафтов таежной зоны ЗС составляет 54.6 Мга, а ее заболоченность – 29% (при точности карты в 79%). Болота северной, средней, южной тайги и подтайги занимают 21.1, 19.3, 12.0 и 2.1 Мга соответственно.

Среди болотных экосистем ЗС доминируют олиготрофные мочажины (24% площади болот) и рьямы (19%). За ними следуют гряды (16%), мезо- и эвтрофные мочажины (16%), водные поверхности (11%), обводненные мочажины (10%) и мерзлые бугры (3%).

Распределение площадей болотных экосистем имеет четко выраженную зональность. С севера на юг существенно возрастают площади рьямов, а также мезо- и эвтрофных мочажин, в то время как площади обводненных мочажин уменьшаются.

Новая карта в перспективе позволит более детально и точно оценить эмиссию метана и сток диоксида углерода и станет основой для новых оценок вклада болот Западной Сибири в регуляцию глобального климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-35-00340.

FUNDING

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-35-00340.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 8. С. 285–302.
2. *Величко А.А., Тимирева С.Н., Кременецкий К.В., МакДональд Г., Смит Л.* Западно-Сибирская равнина в облике позднеледниковой пустыни // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 16–28.
3. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 39–50.
4. *Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н., Мельцер Л.И., Романова Е.А., Богоявленский Б.А., Махно В.Д.* Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. Т. 250. С. 21–34.
5. *Исаченко А.Г.* Ландшафты СССР. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. 320 с.
6. *Кац Н.Я., Нейштадт М.И.* Болота // Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь / под ред. Г.Д. Рихтера. М.: Изд. АН СССР, 1963. С. 230–248.
7. *Лапшина Е.Д.* Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. 296 с.
8. *Лашинский Н.Н., Писаренко О.Ю.* Аналогии апаболот в подтаежной зоне Западной Сибири // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны / Материалы международного научно-практического семинара. Минск, 30 сентября–1 октября 2009 г. Минск: Право и экономика, 2009. С. 194–197.
9. *Лисс О., Абрамова Л., Аветов Н., Березина Н., Инисева Л., Курнишкова Т., Слука З., Толпышева Т., Шведчикова Н.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Ко, 2001. 584 с.
10. *Романова Е.А.* Растительность болот // Растительный покров Западно-Сибирской равнины / под ред. И.С. Ильиной. Новосибирск: Наука СО, 1985. С. 138–160.
11. *Романова Е.А., Быбина Р.Т., Голицина Е.Ф., Иванова Г.М., Усова Л.И., Трушников Л.Г.* Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Л.: ГУГК, 1977. 500 с.
12. *Сочава В.Б., Лавренко Е.М.* Геоботаническая карта СССР. 1954. Масштаб 1 : 4000000.
13. *Усова Л.И.* Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. СПб.: Нестор-История, 2009. 80 с.
14. *Фридланд В.М.* Почвенная карта РСФСР. М.: ГУГК, 1988.
15. *Юрковская Т.К.* Геоботаническое картографирование и составление аналитических карт растительности // Актуальные проблемы геоботаники. III Всерос. школа-конф. Лекции. 2007. С. 43–71.
16. *Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahn R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov S.* WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosciences. 2015. V. 12. № 11. P. 3321–3349.
17. *Congalton R.G., Green K.* Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. CRC press, 2008.
18. *Cowell D.W.* Earth Sciences of the Hudson Bay Lowland: Literature Review and Annotated Bibliography. Lands Directorate, Environment Canada, 1982.
19. *Denman K.L. et al.* Climate change 2007: the physical science basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. Ch. 7. P. 499–588.
20. *Frey K.E., Smith L.C.* How well do we know northern land cover? Comparison of four global vegetation and wetland products with a new ground-truth database for West Siberia // Global Biogeochemical Cycles. 2007.

- V. 21. № 1.
<https://doi.org/10.1029/2006GB002706>
21. *Gluck M.J., Rempel R.S., Uhlig P.* An evaluation of remote sensing for regional wetland mapping applications. Sault Ste. Marie: Ontario Forest Research Institute, 1996. 33 p.
 22. *Gong P., Wang J., Yu L., Zhao Y., Zhao Y., Liang L., Niu Z., Huang X., Fu H., Liu S., Li C.* Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data // *Int. J. Remote Sensing*. 2013. V. 34. № 7. P. 2607–2654.
 23. *Lehner B., Döll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrology*. 2004. V. 296. № 1–4. P. 1–22.
 24. *Motohka T., Nasahara K.N., Oguma H., Tsuchida S.* Applicability of green–red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology // *Remote Sensing*. 2010. V. 2. № 10. P. 2369–2387.
 25. *Niu Z., Zhang H., Wang X., Yao W., Zhou D., Zhao K., Zhao H., Li N., Huang H., Li C., Yang J.* Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008 // *Chinese Science Bulletin*. 2012. V. 57. № 22. P. 2813–2823.
 26. *Ozesmi S.L., Bauer M.E.* Satellite remote sensing of wetlands // *Wetlands ecology and management*. 2002. V. 10. № 5. P. 381–402.
 27. *Page S.E., Rieley J.O., Banks C.J.* Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. № 2. P. 798–818.
 28. *Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y.* An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands // *Env. Res. Let.* 2009. V. 4. № 4. P. 045014.
 29. *Prigent C., Papa F., Aires F., Rossow W.B., Matthews E.* Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112.
<https://doi.org/10.1029/2006JD007847>
 30. *Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P.* A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. V. 18. № 3.
 31. *Tiner J., Ralph W.* Use of high–altitude aerial photography for inventorying forested wetlands in the United States // *Forest Ecol. and Management*. 1990. V. 33. P. 593–604.
 32. *Whitcomb J., Moghaddam M., McDonald K., Kellendorfer J., Podest E.* Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-Band radar satellite imagery // *Canadian J. Remote Sensing*. 2009. V. 35. № 1. P. 54–72.
 33. *Zhuang Q., Melillo J.M., Sarofim M.C., Kicklighter D.W., McGuire A.D., Felzer B.S., Sokolov A., Prinn R.G., Steudler P.A., Hu S.* CO₂ and CH₄ exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century // *Geophys. Res. Let.* 2006. V. 33. № 17.

Western Siberia's Taiga Wetlands Mapping Based on Remote Sensing Data

I. E. Terentieva^{1, *}, I. V. Filippov^{2, **}, A. F. Sabrekov^{1, 2, 3, ***}, M. V. Glagolev^{2, 3, 4, 5, ****},
 J. A. Kurbatova^{1, *****}, and S. Maksyutov^{6, *****}

¹*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russia*

²*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

³*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁵*Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Moscow Oblast, Russia*

⁶*National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan*

**e-mail: kleptsova@gmail.com*

***e-mail: filip83pov@yandex.ru*

****e-mail: misternickel@mail.ru*

*****e-mail: m_glagolev@mail.ru*

******e-mail: kurbatova.j@gmail.com*

******e-mail: shamil@nies.go.jp*

Investigations of wetlands are important for understanding the climate processes because wetlands are the source of methane and the tank of CO₂. However, high fine-scale heterogeneity of wetlands complicates estimating carbon balance using point observations. To estimate methane emission, we mapped wetlands and water body areas in taiga of Western Siberia using supervised classification of Landsat images. For these purposes, we used our own dataset of field observation on 28 test sites as well as the high-resolution images. A wetland classification scheme included 6 main wetland types that are widely spread in taiga zone. Overall accuracy of 79% was calculated using 1082 polygons of 10 × 10 pixel size. Wetland area was estimated at 54.6 Mha or 11% of the global wetland areas. The average area of wetlands reached 29% of the zone area. Patterned bogs dominated in taiga (31% of the wetland area) followed by patterned bogs with lakes (18%) and forested bogs (18%). Fens (16%), water bodies (11%) and palsa complexes covers the rest of the area. We expect considerable growth of the regional methane flux as a result of significant changes of wetland areas comparing to the previous estimates. New map might be useful for model and global wetland dataset validation.

Keywords: Western Siberia, wetlands, peatlands, methane, carbon dioxide, wetland map, Landsat

REFERENCES

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyay E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2011, no. 8, pp. 285–302. (In Russ.).
2. Velichko A.A., Timireva S.N., Kremeneckij K.V., MakDonal'd G., Smit L. West Siberian Plain as a late glacial desert. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 4, pp. 16–28. (In Russ.).
3. Vomperskii S., Tsyganova O., Kovalev A., Glukhova T., Valyaeva N. Paludified soils and mires of Russia and carbon pool of their peat. In *Krugovorot Ugleroda na Territorii Rossii* [Carbon Cycle in Russia]. Moscow: Ministerstvo Nauki i Tekhnologii RF, 1999, pp. 124–145. (In Russ.).
4. Il'ina I.S., Lapshina E.I., Lavrenko N.N., Mel'tser L.I., Romanova E.A., Bogoyavlenskii B.A., Makhno V.D. *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* [West Siberian Plain Vegetation Cover]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985. 248 p.
5. Isachenko A.G. *Landshafty SSSR* [Landscapes of the USSR]. St. Petersburg: Leningrad. Gos. Univ., 1985. 320 p.
6. Kats N., Neishtadt M.I. Peatlands. In *Prirodnye usloviya i estestvennye resursy SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Environmental Conditions and Natural Resources of the USSR. Western Siberia]. Rikhter G.D., Ed. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1963, pp. 230–248. (In Russ.).
7. Lapshina E.D. *Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* [The Flora of the South-East of Western Siberia]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ., 2004. 296 p.
8. Lashchinskii N.N., Pisarenko O.Yu. Aapa peatlands in subtaiga of Western Siberia. In *Rastitel'nost' bolot: sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany* [Peatland Vegetation: Modern Problems of Classification, Mapping, Usage, and Protection]. Minsk: Pravo i Ekon. Publ., 2009. 194 p. (In Russ.).
9. Liss O., Abramova L., Avetov N., Berezina N., Inisheva L., Kurnishkova T., Sluka Z., Tolpysheva T., Shvedchikova N. *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Wetland Systems of West Siberia and Their Importance for Nature Conservation]. Tula: Grif i Ko Publ., 2001. 584 p.
10. Romanova E.A. Peatland vegetation. In *Rastitel'nost' bolot. Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Vegetation Cover of the West Siberian Plain]. Il'ina I.S., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, pp. 138–160. (In Russ.).
11. Wetland Typology Map of the West Siberian Lowland. Romanova E.A., Ed. Leningrad: GUGK Publ. 1977. 500 p. (In Russ.).
12. Geobotanical Map of the USSR. Sochava V.B., Lavrenko E.M., Eds. (In Russ.).
13. Usova L.I. *Prakticheskoe posobie po landshaftnomu deshifirovaniyu aerofotosnimkov razlichnykh tipov bolot Zapadnoi Sibiri* [Practical Guide on Classification of Different Wetland Types of Western Siberia by Aerial Images]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2009. 80 p.
14. The Soil Map of the Russian Soviet Federative Socialist Republic. Fridland V.M., Ed. Moscow: GUGK Publ. 1988.
15. Yurkovskaya T.K. Geobotanical mapping and drawing up of analytical vegetation maps. In *Aktual'nye Problemy Geobotaniki. III Vserossiiskaya Shkola-Konferentsiya* [Actual Problems of Geobotany. III All-Russia School-Conf. Lectures]. Petrozavodsk: Karel'skii Nauchn. Tsentr RAN, 2007, pp. 43–71. (In Russ.).
16. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahn R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov S. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. *Biogeosci.*, 2015, vol. 12, no. 11, pp. 3321–3349.
17. Congalton R.G., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC press, 2008. 328 p.
18. Cowell D.W. *Earth Sciences of the Hudson Bay Lowland: Literature Review and Annotated Bibliography*. Burlington, Ont.: Lands Directorate, Environ. Canada, 1982. 309 p.
19. Denman K.L., et al. Climate change 2007: the physical science basis. In *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S., Qin D., Manning M., et al., Eds. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007, ch. 7, pp. 499–588.
20. Frey K.E., Smith L.C. How well do we know northern land cover? Comparison of four global vegetation and wetland products with a new ground-truth database for West. *Global Biogeochem. Cycles*, 2007, vol. 21, no. 1. doi 10.1029/2006GB002706
21. Gluck M.J., Rempel R.S., Uhlig P. *An evaluation of remote sensing for regional wetland mapping applications*. Sault Ste. Marie: Ontario Forest Res. Inst. 1996. 33 p.
22. Gong P., Wang J., Yu L., Zhao Y., Zhao Y., Liang L., Niu Z., Huang X., Fu H., Liu S., Li C. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *Int. J. Remote Sens.*, 2013, vol. 34, no. 7, pp. 2607–2654.
23. Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrol.*, 2004, vol. 296, no. 1–4, pp. 1–22.
24. Motohka T., Nasahara K.N., Oguma H., Tsuchida S. Applicability of green–red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sens.*, 2010, vol. 2, no. 10, pp. 2369–2387.
25. Niu Z., Zhang H., Wang X., Yao W., Zhou D., Zhao K., Zhao H., Li N., Huang H., Li C., Yang J. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Sci. Bull.*, 2012, vol. 57, no. 22, pp. 2813–2823.
26. Ozesmi S.L., Bauer M.E. Satellite remote sensing of wetlands. *Wet. Ecol. Manag.*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 381–402.

27. Page S.E., Rieley J.O., Banks C.J. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Glob. Chang. Biol.*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 798–818.
28. Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands. *Environ. Res. Lett.*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 045014.
29. Prigent C., Papa F., Aires F., Rossow W.B., Matthews E. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *J. Geoph. Res.*, 2007, vol. 112, no. D12. doi 10.1029/2006JD007847
30. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2004, vol. 18, no. 3.
31. Tiner J., Ralph W. Use of high-altitude aerial photography for inventorying forested wetlands in the United States. *Forest Ecol. Manag.*, 1990, vol. 33, pp. 593–604.
32. Whitcomb J., Moghaddam M., McDonald K., Kellndorfer J., Podest E. Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-Band radar satellite imagery. *Can. J. Rem. Sens.*, 2009, vol. 35, no. 1, pp. 54–72.
33. Zhuang Q., Melillo J.M., Sarofim M.C., Kicklighter D.W., McGuire A.D., Felzer B.S., Sokolov A., Prinn R.G., Steudler P.A., Hu S. CO₂ and CH₄ exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, no. 17.