# Использование данных дистанционного зондирования в изучении перестроек речной сети (на примере верхней Камы)

#### Н. Н. Назаров, С. В. Копытов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 614990, Россия E-mail: sergkopytov@gmail.com

Современная ландшафтная структура Верхнекамской депрессии, читающаяся на многоканальных космических снимках Landsat, выглядит довольно сложно. «Рисунок» геосистем данной территории является отражением истории формирования гидросети в бассейне верхней Камы. Изучение перестройки речной сети в этом регионе является важным элементом в понимании хода природных событий приледниковой зоны востока Русской равнины. На фоне типичных болотных урочищ, отличающихся разнообразием ландшафтной структуры, располагается несколько видов «не болотных» геосистем, конфигурация и разнообразие цветов которых косвенно указывают, во-первых, на их генетическую неоднородность, во-вторых, на принадлежность к образованиям (геосистемам) различного времени заложения и последующего развития. Установление местоположения древних русел — пространственно-временных реперов перестройки гидросети в неоплейстоцене и голоцене — осуществлялось с использованием снимков Landsat-8 OLI 2017 и 2018 гг. съёмки. Процесс определения следов руслового воздействия на поверхность озёрной террасы включал в себя выбор комбинаций каналов, наилучшим образом «показывающих» контуры отдельных эрозионных систем. Дешифрирование космических снимков позволило установить в Верхнекамской депрессии несколько генераций озёрной (первой надпойменной?) террасы. Роль отдельных генераций в её пределах кроме современной камской поймы играют три русловых системы и одна болотно-русловая. По результатам анализа космических снимков наилучшее геоморфологическое выражение эрозионного рельефа было получено для комбинаций каналов ближнего ИК — 7-6-5 (индикация песчаных валов и грив, индикация степени увлажнённости фаций верхового болота) и ближнего, коротковолнового ИК и красного видимого каналов — 5-6-4 (индикация видового состава растительности и степени увлажнённости пойменных и болотных торфяных геосистем).

Ключевые слова: многоканальные космические снимки, Landsat, цифровые модели рельефа, поздний плейстоцен, голоцен, перестройка речной сети, Верхнекамская депрессия, верхняя Кама

Одобрена к печати: 30.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-105-117

#### Введение

Изучение истории формирования гидросети в бассейне верхней Камы является важным элементом в познании и понимании хода событий, происходивших в приледниковой зоне Русской равнины. Пока нет однозначных ответов на вопросы о времени, продолжительности и периодичности объединения бассейна р. Камы с бассейнами р. Вятка, Вычегда и Печора, которые неоднократно происходили при формировании приледниковых подпрудных озёр в среднем и позднем неоплейстоцене (Краснов, 1948; Лавров, Потапенко, 2005; Рябков, 1976; Grosswald, 1980). Внедрение в последние десятилетия новых методов исследований, в первую очередь методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также возросшая доступность материалов космических и радарных съёмок дают новые знания о процессах ледникового морфолитогенеза, скорости и направленности перестройки речной сети в пределах Русской равнины (Лавров, Потапенко, 2012; Назаров, 2017; Назаров и др., 2015; Larsen et al., 2014; Lysa et al., 2014; Mangerud et al., 2004).

В работе (Peltier, 2004) на основании тектонической (гляциоизостатической) деформации поверхности Земли и трансформации поля гравитации на конец висконсинского (вислинского, валдайского) оледенения рассчитана модель ICE-5G (VM2). На основе глобальной цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM с привлечением снимков среднего разрешения воссоздана радиально-маргинальная морфоструктура разновозрастных краевых зон ледниковых покровов в Подмосковье и Ярославском Поволжье. Анализ пластики и расчленённости дневной поверхности поздними русловыми и эрозионными процессами позволил выделить разновидности краевых ледниковых морфоскульптур: аккумулятивные гряды, камы, ложбины стока (Судакова и др., 2015). Для Чудско-Псковской низменности проведено ГИС-моделирование палеогеографической обстановки в течение основных стадий и фаз деградации валдайского оледенения (Карпухина, 2013).

Космические методы изучения древней русловой сети занимают сравнительно небольшое место в исследованиях палеогеографов (палеогеоморфологов, палеогидрологов). В качестве единичных примеров можно отметить территории Восточной Сахары (Ghoneim et al., 2012) и Аравийского полуострова (Breeze et al., 2015), для которых реализованы возможности идентификации палеорусел и палеоозёрных бассейнов на основе снимков Landsat. Более чем скромные результаты изучения древних русловых процессов определены объективными причинами. К ним, прежде всего, следует отнести отсутствие материалов высокого и сверхвысокого разрешения в открытом доступе. Второй причиной, по-видимому, сдерживающей развитие палеогеографических исследований в той степени, в которой нуждается эта наука сегодня, является отсутствие эффективных методик мультиспектральной индикации аккумулятивного рельефа и четвертичных отложений. В первую очередь это касается территорий приледниковых областей. Развитие рельефа в отдельные периоды неоплейстоцена происходило здесь очень активно, а порой и разнонаправлено, создавая тем самым сложную мозаику разновозрастной морфоскульптуры в пределах даже небольших по площади участков.

Особое место в подобных исследованиях занимают вопросы дистанционной идентификации болотных геосистем как реликтов палеоозёр, древних перетоков и спиллвеев. В работе (Amer et al., 2017) на примере дельты Миссисипи рассмотрены вопросы эрозионного потенциала и осадконакопления в болотных ландшафтах устья этой реки, применён ряд влажностных и вегетационных спектральных индексов.

Целый комплекс технологий и приёмов картирования четвертичных отложений и рельефа используется в Канаде и США, где в свободном доступе для научно-практических целей выложены снимки с беспилотных летательных аппаратов, ЦМР, результаты лазерного сканирования, высокоточные измерения спутниковой навигации (Harris et al., 2011). В России существует опыт применения данных космосъёмки для изучения палеогеографических событий Колымской низменности. На основе дешифрирования снимков Landsat проведена реконструкция истории формирования рельефа, а также составлена схема четвертичных отложений (Veremeeva, Glushkova, 2016).

#### Объект и методика исследований

Одной из наиболее сложных территорий бассейна верхней Камы в понимании этапности развития гидросети и рельефа в целом является Верхнекамская депрессия — морфологическое продолжение южной части Кельтминской ложбины (*puc. la*, см. с. 107). Образуя подобие естественного водораздельного перевала между бассейнами Вычегды и Камы, эта ложбина, в силу своего положения и роли в перетоке вод из приледниковых (вычегодских и печорских) водоёмов в бассейн Каспия, становилась каналом сброса временных и/или относительно постоянных водотоков через Верхнекамскую депрессию. Сегодня считается уже установленным фактом неоднократная смена направлений движения русловых потоков в этом понижении в отдельные периоды среднего и позднего неоплейстоцена на запад (в бассейн Вятки) или на восток (в направлении Вишеры) (*puc. 16*). Сложность в понимании общей картины перестройки речной сети в бассейне верхней Камы обусловлена наличием хорошо опознающихся на космических снимках каналов перетока вод из приледниковых водоёмов (не только через Кельтминскую ложбину). Следы русловой деятельности в пределах этих перетоков относятся к разным периодам эрозионной моделировки рельефа. Морфологически на роль транзитеров северных вод в южном направлении претендуют некоторые притоки Тимшера и Весляны, связанные с бассейном Вычегды сквозными ложбинами.



*Рис. 1.* Территория исследования: a — местоположение бассейна верхней Камы на ЦМР GMT-ED2010;  $\delta$  — типы формирования речных долин и направление стока (по (Назаров, 2017)) в бассейне верхней Камы и на смежных территориях в верхнем неоплейстоцене. Типы формирования долины: 1 — однонаправленного прерывисто-руслового развития; 2 — двунаправленного прерывисто-руслового развития (жирные стрелки — направление стока в конце эпохи предпоследнего равнинного оледенения — начале межледниковой эпохи, тонкие стрелки — современное направление стока); 3 озерно-руслового развития (стрелка с заливкой — направление стока в конце эпохи предпоследнего равнинного оледенения — начале межледниковой эпохи); 4 — прорыва; 5 — стока приледниковых озёр (жирные стрелки — направление стока в конце эпохи предпоследнего равнинного оледенения – начале межледниковой эпохи, стрелки без заливки — направление стока во время эпохи последнего равнинного оледенения); приледниковые плотинные озёра: 6 — последнего оледенения, 7 — предпоследнего оледенения

Приступая к поиску следов древних потоков, моделировавших поверхность Верхнекамской депрессии (периодически становившейся вместилищем озёрных вод, поступавших из бассейна Вычегды), следует отметить, что современный «рисунок» геосистем, читающийся на многоканальных космических снимках Landsat, выглядит довольно сложно. На фоне типичных болотных урочищ, отличающихся разнообразием ландшафтной структуры, располагается несколько видов «не болотных» геосистем, конфигурация и разнообразие цветов которых косвенно указывают, во-первых, на их генетическую неоднородность, во-вторых, на принадлежность к образованиям (геосистемам) различного времени заложения и последующего развития.

Решение задачи по установлению местоположения древних русел — пространственно-временных реперов перестройки гидросети в пределах Верхнекамской депрессии в неоплейстоцене и голоцене — осуществлялось с использованием снимков, полученных 13 августа 2017 г. и 12 мая 2018 г. со спутника Landsat-8 OLI (http://earthexplorer.usgs.gov/) с разрешением 30 м в спектральных каналах Coastal/Aerosol (0,435–0,451 мкм), Blue (0,452–0,512 мкм), Green (0,533–0,590 мкм), Red (0,636–0,673 мкм), NIR (0,851–0,879 мкм), SWIR-1 (1,566–1,651 мкм), SWIR-2 (2,107–2,294 мкм), Cirrus (1,363–1,384 мкм). Перед началом работы проведена геометрическая коррекция снимков по опорным точкам, а также выполнена радиометрическая калибровка.

Процесс определения следов руслового воздействия на поверхность озёрной террасы включал в себя на начальном этапе случайный выбор комбинаций каналов, наилучшим образом «показывающих» дешифрировщику контуры отдельных эрозионных систем. В качестве их элементов, как правило, выступали аккумулятивные образования, формирующиеся непосредственно в руслах или на поймах доголоценовых водотоков. К таким формам в пределах относительно ровной поверхности Верхнекамской депрессии относятся древние прирусловые валы, гривы («веера блуждания») и бывшие речные острова.

Распознавание эрозионно-аккумулятивных элементов современной русловой сети даже на чёрно-белых космо- и аэроснимках у геоморфологов и ландшафтоведов обычно не вызывает особых затруднений. Определение генезиса геосистем в таких случаях основывается на учёте прямых признаков. Наиболее простым для распознавания русловых систем в границах депрессии стало выделение камской поймы с характерным для неё набором эрозионно-аккумулятивных форм (*puc. 2a*).



*Рис. 2.* Верхнекамская депрессия: *a* — космический снимок Landsat-8 OLI в комбинации каналов 4–3–2 (естественные цвета); *б* — фрагмент ЦМР ArcticDEM, драпированной космическим снимком SPOT-6. Цифры обозначают: 1 — пойма р. Камы; 2 — целики озёрной террасы; 3 — каналы стока («линии стекания»); 4 — озёра

Внерусловое происхождение, также на основе прямых признаков, с высокой степенью надёжности было установлено для целиков («островов») дюнного рельефа, возвышающихся над поверхностью болот. Относительно просто происходило распознавание микрорельефа и болотных массивов, представленных отрицательными линейными формами каналов стока («линий стекания»), чередованием гряд и мочажин, озёрными ваннами.

Для распознавания и идентификации элементов *древней* эрозионной сети очерёдность дешифрирования изображений разных комбинаций каналов была выбрана с учётом уже имеющихся рекомендаций по их пригодности для выявления на космоснимках различий в увлажнённости геосистем и/или характере (составе, структуре) растительности (Книжников, Кравцова, 1978; Кравцова, 2005; Лямина и др., 2010; Сладкопевцев, 1982; Roy et al., 2014). При этом принималось во внимание, что в условиях болот, которые составляют большую часть площади Верхнекамской депрессии, связь между увлажнённостью торфо-минерального субстрата и собственно растительным покровом (объёмом органического вещества, экологическим состоянием) обычно достаточно тесная, а дешифрировочный эффект комбинирования условий увлажнённости геосистемы с растительным покровом изучен довольно слабо. В целом ряде публикаций российских и зарубежных исследователей отмечены проблемы в интерпретации элементов именно болотных геосистем при использовании спектральных каналов космических снимков (Корниенко, 2017; Amer et al., 2017).

Драпированные космическими снимками новые ЦМР высокого разрешения ArcticDEM позволили с минимальными трудозатратами получить ряд морфометрических показателей, которые контролировали процесс выделения границ аккумулятивных образований. ArcticDEM создана в Полярном геопространственном центре Университета Миннесоты на основе съёмки со спутников WorldView-1/2/3, Geoeye-1 и доступна для полярных регионов Земли с разрешением 2 м/пиксель. Данная ЦМР обладает наилучшей детальностью по сравнению с другими глобальными ЦМР. В условиях отсутствия древесной растительности на болотах ArcticDEM может отражать все особенности мезо- и микрорельефа при небольших относительных высотных перепадах.

Корректировка пространственных данных осуществлялась на основе ЦМР, построенных по имеющимся топографическим картам масштаба 1:25 000, снимкам высокого (со спутника SPOT-6) и сверхвысокого разрешения (данные открытого картографического сервиса ESRI ArcGIS World Imagery) (*puc. 26*). При работе с ЦМР масштаба 1:25 000 учитывался и тот факт, что почти плоская поверхность болот и сильная изрезанность пойм и террас без значительно-го перепада по высоте приводит к отражению множества горизонталей с одинаковыми значениями. Для более точного отображения рельефа вводились дополнительные изолинии и абсолютные отметки, отображающие местность (болотистые понижения, растительные группировки и т.д.), с добавлением в их семантику значений высоты.

Для количественной оценки степени увлажнённости болотных геосистем были использованы наиболее распространённые спектральные индексы, такие как mNDWI (Normalized Difference Water Index) и LSWI (Land Surface Water Index). Индекс mNDWI чувствителен к уровню влажности в растительности (Skakun et al., 2003; Wilson, Sader 2002; Xu, 2006). Использование этого индекса при исследовании болотных геосистем может иметь существенное значение, поскольку он позволяет выявлять как избыточно увлажнённые, так и хорошо дренированные биотопы. Расчёт индекса проводился по формуле: mNDWI = (Green – SWIR)/(Green + SWIR). Комбинация синего (канал 2) и коротковолнового (канал 6) ИК, используемая в LSWI, и аналогичные индексы, такие как GVMI (Ceccato et al., 2002), очень чувствительны к содержанию воды на поверхности суши (Boles et al., 2004). Расчёт индекса проводился по формуле: LSWI = (Blue – SWIR)/(Blue + SWIR). Для выявления наиболее отчётливого контраста в увлажнении в расчёте был использован только летний (меженный) снимок от 13 августа 2017 г.

Для сопоставления с данными ДЗЗ были привлечены результаты полевых работ, проводившихся на ключевых участках в долинах и междуречьях р. Кама, Южная Кельтма, Пильва и Тимшер. В ходе экспедиций проводились зачистки эрозионных уступов разновозрастных элементов — пойм, надпойменных террас, бортов древних долин, бурение скважин в болотных массивах и отбор образцов на радиоуглеродный анализ. Опробование осуществлялось преимущественно из торфов, растительного детрита, погребённых почв, органогенно-минеральных слоёв (оторфованных суглинков) и древесных остатков, обнаруженных *in situ* в песчаных толщах террас. В результате был получен широкий набор датировок, начиная от 11 тыс. лет назад до настоящего времени.

#### Результаты исследований

Попытка выявления древних русловых систем в Верхнекамской депрессии началась с комбинации каналов видимого диапазона (4-3-2 — «естественные цвета») и продолжилась с использованием комбинаций «искусственных цветов». С использованием космоснимков в качестве картографической основы (Сладкопевцев, 1982) была подготовлена серия палеогеоморфологических космофотокарт, выполнявших роль дешифрировочной основы для выделения отдельных русловых систем. Данный подход был оправдан, поскольку точная информация о количестве таких систем в депрессии и о том, в какой её части они находятся, была неизвестна. Выбор основы (космоснимка определённого спектрального канала) определялся наилучшим (наиболее качественным) отражением структурных элементов анализируемой системы при относительной «невыразительности» смежных с ней морфологических элементов, относящихся к массивам болот, эоловым образованиям или другим доголоценовым пойменно-русловым комплексам.

Выделение центральной русловой системы (ЦРС) происходило в процессе работы с изображением, полученным в синем спектре (рис. За, см. с. 111) летнего снимка (13.08.2017). Комбинация 7-6-5 не включает ни одного канала из видимого диапазона, но обеспечивает оптимальное распознавание местоположения песчаных грив и валов, оконтуривающих полосу блуждания древней реки (пра-Камы?). Аккумулятивные формы (гривы, прирусловые валы) контрастно-жёлтым цветом на синем фоне отделяют ЦРС от смежных урочищ, причём границы эрозионной системы, скрытые в отдельных частях её периферии толщей торфа, в данной комбинации каналов практически не поддаются опознаванию (*puc. 36*). Самый «молодой» фрагмент остаточного русла — старица (о. Нахты) и примыкающие к ней «веера блуждания» — представляет собой одну из самых последних генераций древней речной поймы, которая моделировала озёрную террасу и усложняла первичный рельеф древней озёрной поверхности. Судя по взаимоположению фаций руслового и болотного генезиса, русловые процессы в этой части депрессии имели развитие в самом конце позднего неоплейстоцена, задолго до наступления стадии её активного заболачивания. Интересно, что практически весь контур самой последней генерации древней поймы в пределах ЦРС становится видимым при визуальном и количественном контроле степени увлажнённости болотного массива. Границы этой генерации изображаются в виде резкой смены цвета (в виде линии). Тёмносиний цвет, присущий контуру самой молодой генерации, указывает на повышенную степень её обводнённости по сравнению с другой частью ЦРС, отличающейся более светлыми тонами — от светло-голубого до голубого. Рассчитанные спектральные влажностные индексы изменяются от 0,02 до 0,23 для LSWI и от 0 до 0,18 для mNDWI, оконтуривая тем самым разные по возрасту геосистемы (рис. 3в, г).

Использование комбинации ближнего, коротковолнового ИК и красного видимого каналов (5–6–4) позволило установить местоположение ещё одной эрозионной системы, протягивающейся вдоль северного коренного склона Верхнекамской депрессии, на южной окраине, контактирующей с ЦРС (*рис. 4a*, см. с. 112). Следует подчеркнуть, что западнее депрессии (в долине Камы) северная русловая система (СРС) и современная пойма являются основными геосистемными элементами, располагающимися параллельно долине реки практически до устья р. Весляны. Наиболее чётко СРС выделяется в западной части депрессии. Здесь её граница с ЦРС, кроме цветовых различий, хорошо опознаётся и на основе прямых признаков — русловых гряд и целиков древней озёрной террасы. По цвету на космоснимке различия между двумя русловыми системами более чем существенные и в значительной степени также связаны с разделяющими их положительными формами рельефа (валами, гривами, целиками озёрной террасы). Вытянутые по границе русловых систем, эти образования хоть и не полностью, но становятся преградой для проникновения поверхностных вод со склона депрессии в заболоченную котловину. Долины ручьёв и небольших рек в этой её части служат каналами стока минерального и органического вещества. В присклоновой части болотного массива формируются особые условия накопления материала. По сравнению с типичными верховыми болотами (голубой, тёмно- и светло-синий цвета), которые распространены в центральной и прилегающей к камской пойме частях депрессии, линии стекания формируют красно-коричнево-малиновый фон с большей или меньшей плотностью крапа (признак редколесья). Необходимо отметить, что прорывы минерально-органических вод в пределы ЦРС, приводящие к образованию и в её пределах линейно вытянутых шлейфов красноватого цвета, тем не менее не оказывают определяющего дешифрировочного значения, как и наличие полос голубого цвета в пределах СРС на участках, где отсутствует сток со склонов депрессии.



*Рис. 3.* Фрагмент (западная часть) ЦРС: *а* — космический снимок Landsat-8 OLI в комбинации каналов 7–6–5; *б* — разновозрастные генерации ЦРС; *в*, *г* — индексы LSWI и mNDWI, рассчитанные по снимку Landsat-8 OLI за 13.08.2017. Условные обозначения: 1 — контур ЦРС, не затронутой последним (по времени) переформированием русловой сети (древняя генерация); 2 — последняя (по времени) генерация ЦРС; 3 — пойма р. Камы

Наиболее чётко цветовая дифференциация СРС сформировалась на право- и левобережных участках р. Бортом (*puc. 46*). Наличие болотной реки, дренирующей значительную площадь СРС, привело к формированию в её левобережной части болотного ряма — зарастающего лесом болота (красновато-малиновый цвет, переходящий в буровато-зелёный), при этом правобережная часть имеет все черты типичного верхового болота (цвет — от светло-голубого до тёмно-синего в наиболее переувлажнённых местах).



*Рис. 4.* Генерации древней русловой сети: *a* — космический снимок Landsat-8 OLI в комбинации каналов 5–6–4; *б* — фрагмент (западная часть) СРС; *в* — контуры разновременных русловых систем; *г* — возраст формирования террасы р. Тимшер (калиброванная дата). Условные обозначения: 1 — контур СРС; 2 — контур ЦРС; 3 — контур ОРС; 4 — пойма р. Камы; 5 — радиоуглеродная калиброванная дата. Цифры обозначают: 6 — каналы стока; 7 — доголоценовые русла

Сложнее всего интерпретировать и вычленять эрозионные системы оказалось там, где наблюдается пространственное объединение ЦРС, СРС и современной поймы р. Тимшер (*puc. 4в*). Унаследованность местоположения эрозионных систем, при котором молодые водотоки используют старые пойменные понижения в качестве своих долин, не является редким случаем в истории развития русловых систем и объясняется энергетической выгодностью подобного их функционирования. С места соединения этих трёх систем (ЦРС, СРС, Тимшерская пойма) и до устья р. Окос их пойменно-террасовые комплексы взаимодействовали по типу вложения более молодой геосистемы в предшествующую: Тимшерская пойма — в ЦРС, ЦРС — в СРС, СРС — в «озёрную». Контур объединённой русловой системы (OPC) довольно уверенно опознаётся по песчаным «островам» с редкой растительностью, которые выделяются по розовому и малиновому цветам на фоне голубого цвета верхового болота. Внутри системы зеленовато-бурым цветом (до жёлтого) выделяется современная пойма Тимшера и серо-розовым цветом — фрагменты грядового рельефа ЦРС.

При всей энергетической выгодности использования более поздними водотоками ранее выработанных ложбин новообразованные системы могут испытывать определённые ограничения в своём развитии из-за различий геолого-геоморфологических условий, в которых формирование пойменно-руслового комплекса шло раньше и идёт в процессе формирования новой русловой системы. Обычно периоды перестроек русловой сети составляют от нескольких тысяч до первых десятков тысяч лет и знаменуют собой смены климата, а в горных и предгорных территориях — активность тектонических движений. Окончание («исчезновение») ОРС в результате индивидуализации русловых систем происходит на участке впадения

р. Окос в Тимшер. Здесь наблюдается отклонение почти на 90° вправо от направления поймы Тимшера и примерно на 40° ЦРС от направления ОРС. Далее своё развитие на север и северо-восток продолжает, по-видимому, лишь СРС, которая уверенно опознаётся продольной заболоченной котловиной в светло-голубом цвете. Вход в болотный массив и выход из него «выкрашен» серо-розовыми цветами, указывающими на местоположение скоплений наносов («пробок»), заполнивших древнюю долину в результате деятельности эрозионно-аккумулятивных процессов в смежных русловых системах. Формирование пересыпей происходило по контакту с отклонившейся вправо ЦРС на юге и на севере — в месте её пересечения долиной р. Чепец на входе в Кельтминскую ложбину.

Показательным примером влияния смены геолого-геоморфологических условий на развитие унаследованных русловых систем являются морфологические особенности русла и поймы Тимшера. Даже без специальных вычислений коэффициента меандрированности (извилистости) русла реки на участке ОРС и ниже по течению уже в пределах ЦРС видно, что значения этого показателя очень сильно разнятся: происходит не только увеличение коэффициента на нижнем участке реки, но и наблюдается увеличение радиусов излучин. Не менее иллюстративна смена покомпонентных характеристик поймы реки (высота поймы, литология пойменных отложений, степень увлажнённости, состав растительности и др.). Эти особенности в пределах ОРС и ЦРС выявляются по цветовой раскраске данной геосистемы. Для первой в качестве основных цветов на космоснимке выступают жёлтый и серо-зелёный, а для второй — зелёный (в основном) и фрагментарно тёмно-розовый в виде крапа.

Болотно-русловая система (БРС), включающая в себя большую часть территории Верхнекамской депрессии, располагается между ЦРС и современной поймой р. Камы. Русловые образования, фиксируемые среди болотных геосистем, представлены двумя видами. К первому относятся современные каналы стока вод из центральной части болота к его периферии. На космоснимке (комбинация 5–6–4) они выглядят как тёмно-синие относительно прямолинейные линии на зеленовато-голубом фоне. Цвет линий указывает на сильную переувлажнённость торфа и образование поверхностного стока. Ко второму виду были отнесены древние доголоценовые русла или отдельные элементы их пойм, «просвечивающие» через толщи торфа или фиксирующиеся сменой болотной растительности, реагирующей на степень минерализации и увлажнённости субстрата. На космическом снимке особый, отличный от ровного рельефа озёрной террасы, более контрастный их рельеф (чередование грив и ложбин, вдольбереговые валы) опознаётся по сериям линий цветовой раскраски от светло-зелёного и розового до почти коричневого. Самая крупная подобная (центральная) форма древнего русла (цепочка озёр Б. Кумикуш, М. Кумикуш, Дикое), протягивающаяся параллельно Каме в сторону Южной Кельтмы, имеет поздненеоплейстоценовый возраст, поскольку пересекается поймо-террасовым комплексом р. Южная Кельтма и Тимшер. По данным радиоуглеродного датирования время формирования первой надпойменной террасы р. Тимшер составляет 9890±170 Лу-8725 (рис. 4г). Меньшими по размеру, но также представляющими доголоценовые русловые формы БРС, являются древние гривы на северо-востоке депрессии (к западу от п. Чепец). Гривы и межгривные понижения хорошо опознаются по составу растительности для первых и высокой степени увлажнённости торфа для вторых.

#### Заключение

Дешифрирование космических снимков, полученных в разных комбинациях каналов, впервые позволили установить для всего Верхнекамья несколько генераций озёрной (первой надпойменной?) террасы. Роль отдельных генераций в пределах Верхнекамской депрессии (рассматриваемой ранее в качестве комплекса болотных массивов с остаточными озёрами) кроме современной камской поймы играют ещё три русловые системы и одна болотно-русловая. «Рисунок» геосистем данной территории является отражением истории формирования гидросети в бассейне верхней Камы. На фоне типичных болотных урочищ, отличающихся разнообразием ландшафтной структуры, располагаются несколько видов «не болотных» геосистем, конфигурация и разнообразие цветов которых косвенно указывают на их генетическую неоднородность и принадлежность к образованиям (геосистемам) различного времени заложения и последующего развития.

По результатам анализа космических материалов наилучшее геоморфологическое выражение эрозионного рельефа было получено для комбинаций каналов: 1) ближнего ИК (7-6-5) — индикация минеральных (песчаных) валов и грив, индикация степени увлажнённости фаций верхового болота; 2) ближнего, коротковолнового ИК и красного видимого каналов (5-6-4) — индикация видового состава растительности и степени увлажнённости пойменных и болотных (торфяных) геосистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00356).

## Литература

- 1. *Карпухина Н. В.* Особенности деградации осташковского ледникового покрова в пределах Чудско-Псковской низменности // Геоморфология. 2013. № 4. С. 38–47.
- 2. *Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И.* Многозональная аэрокосмическая съемка и ее применение при изучении окружающей среды. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1978. 47 с.
- 3. *Корниенко С. Г.* Вариации коэффициентов отражения в красной, ближней инфракрасной области спектра и индекса NDVI образцов тундровой растительности в зависимости от влажности субстратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 225–234.
- 4. Кравцова В. И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
- 5. *Краснов И. И.* Четвертичные отложения и геоморфология Камско-Печорско-Вычегодского водораздела и прилегающих территорий // Материалы по геоморфологии Урала. М.-Л.: Изд-во Мин. геол. СССР, 1948. Вып. 1. С. 47–88.
- 6. *Лавров А. С., Потапенко Л. М.* Неоплейстоцен северо-востока Русской равнины. М.: Аэрогеология, 2005. 348 с.
- 7. Лавров А. С., Потапенко Л. М. Неоплейстоцен Печорской низменности и Западного Притиманья (стратиграфия, палеогеография, хронология). М.: ОАО «Можайский полиграфический комбинат», 2012. 191 с.
- 8. Лямина В. А., Королюк А. Ю., Зольников И. Д., Смоленцев Б. А., Лащинский Н. Н. Генерализация ландшафтных обстановок в спектральных характеристиках космических снимков различного пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2010. № 4. С. 77–84.
- 9. *Назаров Н. Н.* Плейстоценовые перестройки речных русел и современное развитие пойменно-русловых комплексов верхней Камы // Геоморфология. 2017. № 3. С. 88–100.
- 10. *Назаров Н. Н., Чернов А. В., Копытов С. В.* Перестройки речной сети Северного Предуралья в позднем плейстоцене и голоцене // Географический вестник. 2015. № 3. С. 26–34.
- 11. *Рябков Н. В.* Древние приледниковые бассейны междуречья Камы, Печоры, Вычегды и их реликты // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1976. № 45. С. 94–105.
- 12. Сладкопевцев С.А. Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации. М.: Недра, 1982. 216 с.
- 13. *Судакова Н. Г., Карпухин С. С., Алтынов А. Е.* Палеогеографические реконструкции ледниковых морфолитоструктур Подмосковья с использованием космической информации // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2015. № 74. С. 76–89.
- Amer R., Kolker A. S., Muscietta A. Propensity for erosion and deposition in a deltaic wetland complex: Implications for river management and coastal restoration // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 199. P. 39–50.
- 15. *Boles S. H., Xiao X., Liu J., Zhang Q., Munkhtuya S., Chen S., Ojima D.* Land cover characterization of temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90. P. 477–489.
- Breeze P.S., Drake N.A., Groucutt H.S., Parton A., Jennings R. P., White T.S., Clark-Balzan L., Shipton C., Scerri E. M. L., Stimpson C.S., Crassard R., Hilbert Y, Alsharekh A., Al-Omari A., Petraglia M. Remote sensing and GIS techniques for reconstructing Arabian palaeohydrology and identifying archaeological sites // Quaternary Intern. 2015. V. 382. P. 98–119.

- 17. *Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S.* Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 82. P. 188–197.
- 18. *Ghoneim E., Benedetti M., El-Baz F.* An integrated remote sensing and GIS analysis of the Kufrah Paleoriver, Eastern Sahara // Geomorphology. 2012. V. 139–140. P. 242–257.
- Grosswald M. G. Late Weichselian Ice Sheets of Northern Eurasia // Quaternary Research. 1980. V. 13. P. 1–32.
- Harris J. R., Wickert L., Lynds T., Behnia P., Rainbird R., Grunsky E., McGregor R., Schetselaar E. Remote Predictive Mapping 3. Optical Remote Sensing — A Review for Remote Predictive Geological Mapping in Northern Canada // Geoscience Canada. 2011. V. 38(2). P. 49–83.
- Larsen E., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D., Lysa A., Subetto D. Subglacial sediment, proglacial lake-level and topographic controls on ice extent and lobe geometries during the Last Glacial Maximum in NW Russia // Quaternary Science Reviews. 2014. V. 92. P. 369–387.
- 22. *Lysa A., Jensen M.A., Larsen E., Fredin O., Demidov I.N.* Ice-distal landscape and sediment signatures evidencing damming and drainage of large pro-glacial lakes, northwest Russia // Boreas. 2011. V. 40. P. 481–497.
- Lysa A., Larsen E., Buylaert J.-P., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D. Late Pleistocene stratigraphy and sedimentary environments of the Severnaya Dvina-Vychegda region in northwestern Russia // Boreas. 2014. V. 43. P. 759–779.
- Mangerud J., Jacobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G. C. K., Henriksen M., Hjort C., Krinnerm G., Lunkkja J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J. I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1313–1332.
- 25. *Peltier W. R.* Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5g (VM2) model and GRACE // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2004. V. 32. P. 111–149.
- 26. *Roy D. P., Wulder M. A., Loveland T. R.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 145. P. 154–172.
- Skakun R. S., Wulder M. A., Franklin S. E. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. P. 433–443.
- Veremeeva A. A., Glushkova N. V. Relief formation in the regions of the ice complex deposit occurrence: remote sensing and GIS-studies in the Kolyma lowland tundra // Earth's Cryosphere. 2016. V. 20(1). P. 15–25.
- 29. *Wilson E. H., Sader S. A.* Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 80. P. 385–396.
- 30. *Xu H*. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensing imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. P. 3025–3033.

# The use of remote sensing data in the study of river network reorganization (by example of the Upper Kama)

#### N. N. Nazarov, S. V. Kopytov

Perm State University, Perm 614990, Russia E-mail: sergkopytov@gmail.com

The modern landscape structure of the Upper Kama depression looks rather complicated. The geosystem pattern of this territory is a reflection of the history of drainage system formation in the Upper Kama basin. Study of river network reorganization in this region is an important element in understanding the course of natural events in the periglacial zone of the east of Russian Plain. The geosystem pattern is manifested in Landsat multiband satellite images. Typical marsh tracts are distinguished by a variety of landscape structure. Several types of "non-marsh" geosystems stand out against their background. Their configuration and variety of colors indirectly indicate, firstly, genetic heterogeneity of the natural complexes, and secondly, their belonging to landforms of different timing and subsequent development. The location of the ancient channels (spatio-temporal marks of the drainage system reorganization in the Neo-Pleistocene and Holocene) was determined using satellite images Landsat-8 OLI taken in 2017 and 2018 surveys. The process of determining the traces of channel influence on the surface of the lacustrine terrace consisted in selecting the most appropriate band combinations. These combinations best identify the contours of individual erosion systems. The satellite images decoding allowed establishing several generations of the lacustrine (first above-floodplain?) terrace in the Upper Kama depression. Three channel systems and one marshy-channel system play the role of separate generations within the depression except for the modern Kama floodplain. According to the results of the analysis of satellite images, the best geomorphological expression of the erosion relief was obtained for bands combinations of the SWIR and NIR 7-6-5 (indication of sandy bars and ridges, indication of the moistening degree of upper bog facies) and NIR, SWIR and RED bands -5-6-4 (indication of the vegetation species composition and the moistening degree of floodplain and swamp peat geosystems).

**Keywords:** multispectral satellite images, Landsat, digital elevation model, Late Pleistocene, Holocene, river network reorganization, Upper Kama depression, Upper Kama

Accepted: 30.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-105-117

## References

- 1. Karpukhina N.V., Osobennosti degradatsii ostashkovskogo lednikovogo pokrova v predelakh Chudsko-Pskovskoi nizmennosti (Characteristic features of the Ostashkov ice sheet degradation within Chudsko-Pskovskaya Lowland), *Geomorfologiya*, 2013, Vol. 4, pp. 38–47.
- 2. Knizhnikov Yu. F., Kravtsova V. I., *Mnogozonal'naya aerokosmicheskaya s"emka i ee primenenie pri izuchenii okruzhayushchei sredy* (Multiband aerospace sensing and its use in environmental research), Obninsk: VNIIGMI-MCD, 1978, 47 p.
- 3. Kornienko S. G., Variatsii koeffitsientov otrazheniya v krasnoi, blizhnei infrakrasnoi oblasti spektra i indeksa NDVI obraztsov tundrovoi rastitel'nosti v zavisimosti ot vlazhnosti substratov (Variations of red and near-infrared reflectance and NDVI of tundra vegetation as a function of substrate moisture), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 225–234.
- 4. Kravtsova V.I., *Kosmicheskie metody issledovaniya pochv* (Space methods of soil investigation), Moscow: Aspekt Press, 2005, 190 p.
- Krasnov I. I., Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Kamsko-Pechorsko-Vychegodskogo vodorazdela i prilegayushchikh territorii (Quaternary deposits and geomorphology of the Kama–Pechora–Vychegda watershed and adjacent territories), In: *Materialy po geomorfologii Urala* (Materials on the Urals geomorphology), Moscow, Leningrad: Gosgeolizdat, 1948, Vol. 1, pp. 47–87.
- 6. Lavrov A. S., Potapenko L. M., *Neopleistotsen severo-vostoka Russkoi ravniny* (Neopleistocene of the Northeastern Russian Plain), Moscow: Aerogeologiya, 2005, 348 p.
- 7. Lavrov A. S., Potapenko L. M., *Neopleistotsen Pechorskoi nizmennosti i Zapadnogo Pritiman'ya (stratigrafiya, paleogeografiya, khronologiya)* (Neopleistocene of the Pechora lowland and Western Pre-Timan (stratigraphy, paleogeography, chronology)), Moscow: OAO "Mozhaiskii poligraficheskii kombinat", 2012, 191 p.
- 8. Lyamina V.A., Korolyuk A.Yu., Zolnikov I.D., Smolentsev B.A., Lashinsky N.N., Generalizatsiya landshaftnykh obstanovok v spektral'nykh kharakteristikakh kosmicheskikh snimkov razlichnogo prostranstvennogo razresheniya (Reflection of landscape generalization in spectral characteristics of fine, middle and large scale space images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 4, pp. 77–84.
- 9. Nazarov N. N., Pleistotsenovye perestroiki rechnykh rusel i sovremennoe razvitie poimenno-ruslovykh kompleksov verkhnei Kamy (Pleistocene reorganization and recent development of river channels in the upper Kama river basin), *Geomorfologiya*, 2017, No. 3, pp. 88–100.
- 10. Nazarov N. N., Chernov A. V., Kopytov S. V., Perestroiki rechnoi seti Severnogo Predural'ya v pozdnem pleistotsene i golotsene (River's network rearrangements of the northern Pre-Urals in the Late Pleistocene and Holocene), *Geographical bulletin*, 2015, No. 3, pp. 26–34.
- 11. Ryabkov N.V., Drevnie prilednikovye basseiny mezhdurech'ya Kamy, Pechory, Vychegdy i ikh relikty (Ancient glacial basins between the Kama, Pechora, Vychegda and their relicts), *Byulleten' Komissii po izu-cheniyu chetvertichnogo perioda*, 1976, No. 45, pp. 94–105.
- 12. Sladkopevtsev S.A., *Izuchenie i kartografirovanie rel'efa s ispol'zovaniem aerokosmicheskoi informatsii* (Study and mapping of relief using aerospace information), Moscow: Nedra, 1982, 216 p.

- Sudakova N. G., Karpukhin S. S., Altynov A. E., Paleogeograficheskie rekonstruktsii lednikovykh morfolitostruktur Podmoskov'ya s ispol'zovaniem kosmicheskoi informatsii (Paleogeographic reconstructions of glacial morpholitic structures of the Moscow region using space information), *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 2015, No. 74, pp. 76–89.
- Amer R., Kolker A. S., Muscietta A., Propensity for erosion and deposition in a deltaic wetland complex: Implications for river management and coastal restoration, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 199, pp. 39–50.
- Boles S. H., Xiao X., Liu J., Zhang Q., Munkhtuya S., Chen S., Ojima D., Land cover characterization of temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 90, pp. 477–489.
- Breeze P. S., Drake N.A., Groucutt H. S., Parton A., Jennings R. P., White T. S., Clark-Balzan L., Shipton C., Scerri E. M. L., Stimpson C. S., Crassard R., Hilbert Y, Alsharekh A., Al-Omari A., Petraglia M., Remote sensing and GIS techniques for reconstructing Arabian palaeohydrology and identifying archaeological sites, *Quaternary Intern.*, 2015, Vol. 382, pp. 98–119.
- 17. Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S., Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 82, pp. 188–197.
- 18. Ghoneim E., Benedetti M., El-Baz F., An integrated remote sensing and GIS analysis of the Kufrah Paleoriver, Eastern Sahara, *Geomorphology*, 2012, Vol. 139–140, pp. 242–257.
- 19. Grosswald M.G., Late Weichselian Ice Sheets of Northern Eurasia, *Quaternary Research*, 1980, Vol. 13, pp. 1–32.
- Harris J. R., Wickert L., Lynds T., Behnia P., Rainbird R., Grunsky E., McGregor R., Schetselaar E., Remote Predictive Mapping 3. Optical Remote Sensing — A Review for Remote Predictive Geological Mapping in Northern Canada, *Geoscience Canada*, 2011, Vol. 38(2), pp. 49–83.
- Larsen E., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D., Lysa A., Subetto D., Subglacial sediment, proglacial lakelevel and topographic controls on ice extent and lobe geometries during the Last Glacial Maximum in NW Russia, *Quaternary Science Reviews*, 2014, Vol. 92, pp. 369–387.
- Lysa A., Jensen M.A., Larsen E., Fredin O., Demidov I.N., Ice-distal landscape and sediment signatures evidencing damming and drainage of large pro-glacial lakes, northwest Russia, *Boreas*, 2011, Vol. 40, pp. 481–497.
- Lysa A., Larsen E., Buylaert J.-P., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D., Late Pleistocene stratigraphy and sedimentary environments of the Severnaya Dvina-Vychegda region in northwestern Russia, *Boreas*, 2014, Vol. 43, pp. 759–779.
- Mangerud J., Jacobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.C.K., Henriksen M., Hjort C., Krinnerm G., Lunkkja J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I., Icedammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation, *Quaternary Science Reviews*, 2004, Vol. 23, pp. 1313–1332.
- 25. Peltier W. R., Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5g (VM2) model and GRACE, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, Vol. 32, pp. 111–149.
- 26. Roy D. P., Wulder M.A., Loveland T. R., Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 145, pp. 154–172.
- Skakun R. S., Wulder M. A., Franklin S. E., Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, pp. 433–443.
- 28. Veremeeva A.A., Glushkova N.V., Relief formation in the regions of the ice complex deposit occurrence: remote sensing and GIS-studies in the Kolyma lowland tundra, *Earth's Cryosphere*, Vol. 20(1), pp. 15–25.
- 29. Wilson E. H., Sader S. A., Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, pp. 385–396.
- Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensing imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, pp. 3025–3033.