

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА МАСШТАБОВ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПРИЛЕГАЮЩИЕ ТЕРРИТОРИИ

В. Е. Левкевич¹, В. А. Мильман², С. В. Решетник³

¹ Профессор, БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь, v.lev2014@mail.ru

² Зав. сектором, ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, milman@newman.bas-net.by

³ Главный инженер проекта, ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, rsvlad@tut.by

Аннотация

Приводятся результаты исследований по оперативной оценке масштабов влияния водохранилища на берега при развитии переработки берегов и подтоплении прибрежных территорий с помощью дистанционного зондирования беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

Ключевые слова

Переработка берегов, подтопление, прибрежная территория, водохранилище, беспилотный летательный аппарат (БПЛА)

OPERATIONAL ASSESSMENT OF THE SCOPE OF THE COMPLEX IMPACT OF RESERVOIRS ON THE ADJACENT TERRITORIES

V. E. Levkevich, V. A. Milman, S. V. Reshetnik

Abstract

The results of studies on the operational assessment of the scale of the influence of the reservoir on the coast during the development of coastal processing and flooding of coastal areas using remote sensing by unmanned aerial vehicles (UAVs) are presented.

Keywords: Coastal processing, flooding, coastal area, reservoir, unmanned aerial vehicle (UAV)

Введение. Водохранилища представляют собой сложные природно-технические комплексы. Создаваемые на базе рек, озер в различных целях водохранилища наряду с положительным эффектом могут оказывать отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Наиболее опасные явления это абразия – переработка естественных берегов и незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин, а также подпор подземных вод и подтопление прибрежных территорий. В результате переработки и подтопления происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, разрушаются селитебные территории, нарушаются условия жизнедеятельности населения, что приносит значительный ущерб народному хозяйству. В этой связи закономерно встает вопрос об оперативной оценке указанных процессов с целью их предупреждения на основе применения комплекса методов: расчетных, назем-

ных и дистанционных с помощью БПЛА. Данной проблеме и посвящена данная работа.

Материалы и методы. Основой исследования послужили материалы собственных многолетних натуральных наблюдений, проводимых в Белорусском национальном техническом университете, Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси, а также фондовые материалы ряда организаций страны: Белорусского государственного университета, Центрального НИИ комплексного использования водных ресурсов (РУП ЦНИИКИВР) и др.

Результаты и обсуждение. Как известно, основой безопасности жизнедеятельности населения, проживающего вблизи водохранилищ, является достоверный прогноз абразионных процессов, явлений подтопления и определения современных эффективных, с точки зрения экономики, инженерных мероприятий по берегозащите. В Беларуси эксплуатируется более 150 водохранилищ (водоемов, имеющих полный объем более 1,0 млн.м³), протяженность берегов которых составляет более 1500 км. Строятся каскады водохранилищ на р. Неман: ир. Западная Двина (Витебская, Бешенковичская и Полоцкая ГЭС) и др. Только на водохранилище Витебской ГЭС по предварительному прогнозу протяженность берегов, подверженных переработке, составит около 18 км, а на водохранилище Гродненской ГЭС – около 10 км. В связи с этой важной водохозяйственной для Беларуси проблемой возникла необходимость обобщения накопленного фактического материала и результатов научных исследований для разработки технологии оперативного контроля состояния береговой зоны водных объектов.

Исследованиями, проведенными ранее, установлено, что вся береговая линия водоемов условно делится на ряд участков-фрагментов, где преобладают или процессы абразии (переработки), аккумуляции склонов, либо их подтопление [1–9].

На основе метода экспертных оценок и корреляционного анализа была определена значимость отдельных факторов, вызывающих развитие процесса деформации склона, характеризуемой величиной линейной переработки берега S_t , (м), что позволило выделить доминирующие условия:

– для исходного берега пологой формы

$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, i_6, \eta), \quad (1)$$

– для профиля берега обрывистой формы

$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, H_6, d_{50}), \quad (2)$$

где L_p – разгон волны, м; $h_{1\%}$ – высота волны 1%-ной обеспеченности, м; $\Delta H_{\text{бл}}$ – амплитуда колебаний уровней в безледный период, м; H_6 – высота берега, м; i_6 – уклон разрушаемого берегового склона; h_L – средняя глубина по длине разгона волны, м; d_{50} – средний диаметр частиц размываемого грунта, м; η – коэффициент неоднородности грунта.

Подпор грунтовых вод (ГВ), а точнее зона его распространения в берега описывается аналогичными многофакторными зависимостями. На различных

стадиях развития переработки происходит изменение значимости отдельных факторов.

Как известно, береговой процесс на водохранилищах Беларуси, в отличие от крупных, ограничен во времени и имеет конечный срок окончания (стабилизации) переработки, который составляет от 10 до 20 лет. Для оценки степени приближения длины береговой линии водохранилищ к равновесной предложен коэффициент развития береговой линии k_p , который равен отношению протяженности аккумулятивных берегов $L_{ак}$ к длине береговой линии водохранилищ, подверженной переработке $L_{абр}$, т.е.: $k_p = L_{ак} / L_{абр}$. [7-9].

Текущее состояние береговой линии характеризуют: соотношение коэффициента развития k_p и коэффициента извилистости береговой линии $k_{из}$, который равен отношению протяженности береговой линии (или ее отрезков) по кратчайшей прямой L_1 к реально существующей L_2 .

$$\left. \begin{aligned} L_{ак} / L_{абр} &= k_p \\ L_1 / L_2 &= k_{из} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

По величине коэффициента развития k_p можно судить о состоянии береговой линии. При $k_p \rightarrow 1$ береговая линия стремится к равновесной. В первые годы существования водохранилища преобладает абразионное выравнивание склонов. Затем начинает доминировать аккумулятивное выравнивание.

При оценке береговых процессов выделяется как плановое равновесие всей береговой линии водохранилищ, так и профильное равновесие. Плановое равновесие береговой линии определяется соотношением вида $L_{ак} = L_{абр}$. Тогда балансовая модель развития берега на стадии равновесия, соответствующей конечному периоду формирования t_k , имеет следующий вид

$$\int_{t_H}^{t_K} \Sigma (Q_{абр, n}) dt \int \Sigma = \int_{t_H}^{t_K} \left[\sum_{n=1}^N (Q_{ак, n} \pm \Delta Q_{ак, n}) \right] dt \quad (4)$$

где $Q_{абр, n}, Q_{ак, n}$, —соответственно величины объемов материала переработки и аккумуляции, являющиеся функцией времени t для n -го контрольного створа на участке наблюдений, m^3 ; $\Delta Q_{ак}$ — невязка баланса за счет продольного переноса материала переработки по участку и поступлению эрозионного материала в береговую зону с прилегающих территорий, m^3 .

Уравнение (4) выполняется при соблюдении условия (3).

В общем случае процесс развития профиля равновесия определяется режимом движения материала переработки в виде вдольберегового Q_x и поперечного Q_y потоков наносов:

$$Q_{ак} = \Delta Q_{xt} + l_x \cdot \xi_3 \int_{y(t_2)}^{y(t_3)} F(y) dt, \quad (5)$$

где $y(t_2), y(t_3)$ – границы элементарного блока переработки берегового склона, м; ΔQ_{xt} – объем вдольберегового потока наносов, приведенный к единичной ширине береговой отмели l_x , который определяется по эмпирической зависимости В. Мунка, м³ [8]:

$$\Delta Q_{xt} = 0,137 \cdot 10^{-5} l_x h_{1\%}^2, \quad (6)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1% – ой обеспеченности, м.

Для прогнозных решений использовался вероятностно-статистический метод прогноза, основанный на применении регрессионных моделей [7]. Используя (1) и (2), все берегообразующие факторы были агрегированы, что позволило сформировать безразмерные комплексы: $X_1 = L_p/h_L$ – морфометрическая характеристика водоема; $X_2 = h_{1\%}/\Delta H_{\text{бл}}$ – характеристика гидрологического режима; $X_3 = H_6/d_{50}$ – геоморфологическая и грунтовая характеристика берегового склона; $X_4 = i_6/\eta$ – геоморфологическая характеристика берега пологой формы или верхового откоса дамбы или плотины. В результате агрегирования показателей были получены прогнозные модели вида:

– для исходного профиля берега пологой формы

$$S_t = A_0 + A_1 (L_p/h_L) + A_2 (h_{1\%}/\Delta H_{\text{бл}}) + A_3 (i_6/\eta), \quad (7)$$

– для профиля обрывистой формы

$$S_t = A_0 + A_1 (L_p/h_L) + A_2 (h_{1\%} \Delta H_{\text{бл}}) + A_3 (H_6/d_{50}), \quad (8)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – эмпирические коэффициенты, полученные на основе обработки натуральных данных, приведены в [7, 8].

Практический интерес представляет переработка склона на конечной срок – стадию динамического равновесия.

Для оценки подтопления прибрежных территорий выбран ряд тестовых водохранилищ: Заславльское, Криницы, Дрозды, Волчковичское, Чижевское, Дубровское, а также водохранилище Витебской ГЭС. Водоохранилища, на которых проводились экспериментальные исследования, имели различное регулирование, морфометрические характеристики, линейные размеры, срок эксплуатации и тип наполнения (русловое, наливное, озерное) [8–9].

Подтопление земель, прилегающих к водохранилищу, обусловлено как подъемом уровня воды при заполнении водохранилища до нормального подпорного уровня, так и соответственно изменением уровня грунтовых вод. В зависимости от высоты подтопления (глубины залегания уровня грунтовых вод от поверхности земли) выделяют подзоны сильного, умеренного и слабого подтопления. Залегание уровня грунтовых вод от поверхности земли ориентировочно может составлять в подзоне сильного подтопления от 0 до 1,2 м, умеренного – до 2 м, слабого – до 3,0 м. Общая площадь подтопления прибрежных территорий отдельно взятым водохранилищем страны (без учета польдерных систем) в зависимости от природных условий, как показали обследования авторов, может составлять в условиях Беларуси – до 15 % площади водохранилища [4, 8, 9].

Задача оперативной оценки воздействия водных объектов на прилегающие территории выполнялась с помощью применения аэрофотосъемки, моделей подтопления и разрушения берегов.

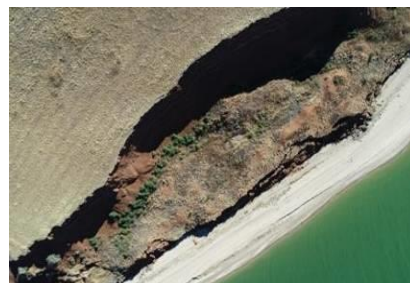
К основным методам мониторинга за состоянием берегов водных объектов относятся экспедиционные визуальные обследования и геодезические измерения. Традиционно данная задача решается с использованием линейных замеров расстояний от реперных точек до бровки размываемого берега с интерполяцией результатов измерений. Это простой, но все же длительный и требующий значительных затрат способ, недостатком которого в т.ч. является субъективность в оценке размыва и подтопления берега.

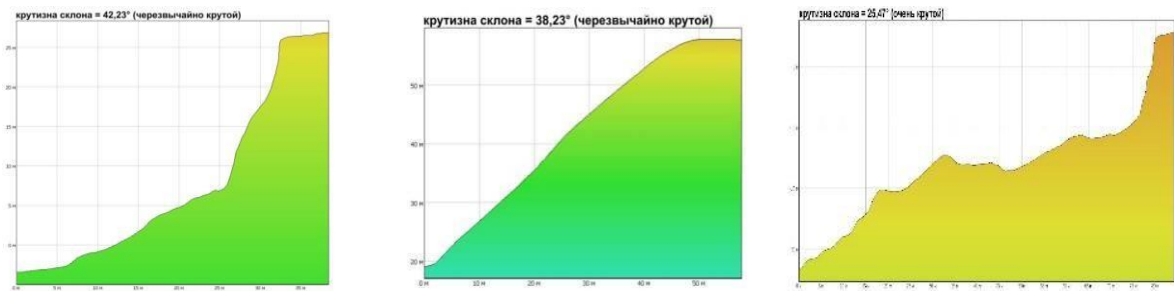
С совершенствованием дистанционных средств получения информации, а именно беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) появилась возможность получать объективную и оперативную информацию об изменениях, происходящих на поверхности Земли. Одним из индикаторов состояния берегов предложено учитывать зависимость интенсивности процесса разрушения от их крутизны и высоты [10–12]. Если берег пологий, то он не подвержен разрушению и поэтому в этом случае преобладает процесс подтопления территории, крутые же берега, напротив, наиболее подвержены разрушению.

Обработка более 5000 снимков с БПЛА по опорным водохранилищам позволила выявить особенности геоморфологического строения берегов разных типов, а также изучить их морфометрические особенности. В результате обработки изображений были выделены: абразионно-обвальная форма берега, абразионно-осыпная форма, абразионно-оползневая и аккумулятивная. На рисунке 1 показаны внешний вид и профили абразионных берегов.

К берегам волнового происхождения относятся и аккумулятивные берега, представленные косами, мысами, переймами и прислоненными пляжами. В отдельный тип выделены низкие берега затопления.

Аккумулятивные берега на водохранилище обычно развиты в зоне затопления поймы и низких аллювиальных террас. Эти берега чаще всего формируются в устье заливов, а также в устьях оврагов и балок. В результате съемок береговой зоны с БПЛА выявлены: аккумулятивные мысы (выступы), косы, переймы, прислоненные пляжи, которые формируются в результате продольного перемещения наносов [10–12].

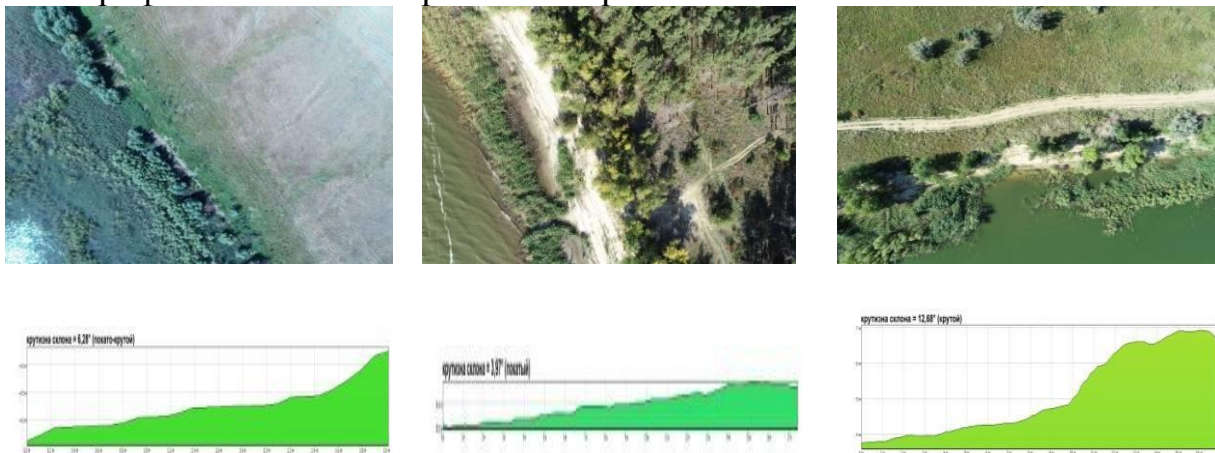




а) абразионно-обвальный б) абразионно-осыпной в) абразионно-оползневой

Рисунок 1 – Фото с БПЛА и построенные профили абразионных берегов [11]

Низкие ровные берега затопления получили широкое распространение в береговой зоне большинства водохранилищ. Такие берега остаются нейтральными, на них не наблюдается заметных размывов и намывов грунта. Низкие берега затопления имеют высоты от 0,2 до 3,8 м; уклоны склона не превышают нескольких градусов и характеризуются как покатые. Берега сложены преимущественно суглинками или толщей переслаиваемых песков и суглинков. Зона пляжа довольно широкая, составляет до 25 м, приурезовая зона зачастую покрыта густой растительностью. На рисунке 2 показаны внешний вид и построенные профили низких нейтральных берегов.



а) низкий берег затопления, нейтральный б) низкие берега затопления с аккумуляцией в) низкие берега затопления с процессами размыва

Рисунок 2 – Фото с БПЛА и профили низких берегов затопления [11]

Величина переработки-абразии берегов водохранилищ определяется путем получения информации с БПЛА в результате съемки по маршрутам и привязкой участков и створов наблюдений к данным съемки. Материалы съемки БПЛА дают плановые очертания и линейные характеристики процесса деформаций, а построение профилей на основе ортопланов – линейные значения по вертикали. Чтобы объективно узнать, какой снимок является наиболее точным, вычисляется средняя квадратическая погрешность для каждого снимка. На

основании набора аэроснимков создается трехмерная модель местности и цифровая модель рельефа (ЦМР). На основании полученных данных строится ЦМР в виде поверхности с рельефными горизонталями.

Многолетние исследования показали, что площади территории прибрежной зоны, подверженной переработке F_s (m^2), могут быть представлены зависимостью вида:

$$F_s = \sum_{n=1}^{50} S_{tвдхр} \cdot L_{абр.,i}, \quad (9)$$

где $S_{tвдхр}$ – линейная переработка по створу n , м; $L_{абр.,i}$ – длина участка береговой линии, подверженной переработке, м.

Современные экзогенные геодинамические процессы (абразия, эрозия, аккумуляция) на водохранилищах соседствуют с подтоплением прибрежных территорий, вызванное подъемом уровня грунтовых вод (УГВ). Процесс подтопления фиксируется на аэрофотоснимках и снимках БПЛА, путем установления регистрации цветового перехода в прибрежной зоне от темных тонов, соответствующих обводненным почвам к светлым, которые присущи менее влажным почвам.

Произведена оценка влияния тестовых водохранилищ: Заславського, Дубровского, Волковичи, Чижовского и водохранилища Витебской ГЭС – путем прогноза подпора подземных вод в прибрежной зоне, натурных обследований и съемкой с применением БПЛА. Для дистанционной съемки был использован дрон-квадрокоптер, представленный ОИПИ НАН Беларуси, а наземные данные были взяты из опубликованных работ и фондовых материалов, представленных д.т.н., профессором Левкевичем В. Е.

В качестве примера на рисунке 3 приведен снимок, полученный с использованием видеокамеры квадрокоптера. На рисунке 3 представлено проявления абразии берегов на тестовом водохранилище.



Рисунок 3 – Заславское водохранилище. Юго-западный абразионный берег. Участок №4. Поперечники № 7-9

Полученные результаты полевых натурных исследований, прогнозных расчетов и их сравнение с данными аэросъемки дрона позволили говорить о возможности применения дистанционных средств в частности, БПЛА для сбора

информации, необходимой для мониторинга прибрежных территорий и эксплуатации водных объектов страны (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты сравнения переработки берегов тестовых водоемов и данных, полученных при съемке с БПЛА

Тестовый водоем	Измеренная средняя линейная переработка по тестовым участкам, (St), м	Данные съемки о линейной переработке с БПЛА, (St), м	Погрешность абсолютная, %
Заславское водохранилище	8,50	8,0	5,9
Дубровское водохранилище	4,50	4,0	11,10
Чижовское водохранилище	5,30	5,0	5,70
Волковичское водохранилище (Птичь)	4,0	3,5	12,5

Ниже в таблице 2 приведены результаты сравнения прогнозных расчетов подпора грунтовых вод и ширины зоны подтопления прибрежных территорий тестовых водоемов, рассчитанных по формуле Каменского Г. С. как наиболее близкой к реальным гидрогеологическим условиям побережий водохранилищ Беларуси и данных, полученных с помощью БПЛА.

Как видно из результатов сравнения (таблицы 1 и 2), точность зафиксированных параметров объектов, подверженных съемкам с БПЛА, значения ширины зоны переработки (абразии) и подтопления являются достаточной, обеспечивающей среднюю погрешность в пределах 15 %, что является допустимой для проведения практических инженерных расчетов.

Таблица 2 – Сравнение результатов прогнозных расчетов подпора подземных вод в прибрежной зоне тестовых водоемов и данных, полученных при съемке с БПЛА

Тестовый водоем	Прогноз подпора УГВ по тестовым участкам		Данные съемки с БПЛА	Погрешность абсолютная, %
	Высота подпора на расстоянии 20м от уреза воды, м	Ширина зоны подтопления, м	Ширина зоны подтопления, м	
Заславское водохранилище	0,40	75,0	65,0	13,3
Дубровское водохранилище	0,50	35,0	35,0	0
Чижовское водохранилище	0,30	40,0	42,0	5
Волковичское водохранилище (Птичь)	0,40	40,0	35,0	12,5

Заключение. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что регистрация и наблюдение за развитием процесса разрушения естественных берегов водохранилищ и подтопления территорий с помощью беспилотных летательных аппаратов – квадрокоптеров, оснащенных камерами с высоким разре-

шением, возможны. Опыт использования БПЛА и полученные результаты съемок получаются достаточно точными, что подтверждают как измеренные наземные данные, так и прогнозные расчеты.

Список цитированных источников

1. Вендров, С. Л. Изменение рельефа берегов и дна Цимлянского водохранилища в 1952-1956 гг. // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1957. – № 3. – С. 75–80.
2. Савкин, В. М. Искусственные пляжи для берегоукрепления и комплексного использования прибрежной зоны на Новосибирском водохранилище / В. М. Савкин, К. В. Марусин, Е. А. Федорова // Тр. Междунар. конф. «Создание и использование искусств. земельных участков на берегах и акватории водоемов», Новосибирск, 20–25 июля 2009 г. – Новосибирск, 2009. – С. 255–261.
3. Абрамов, С. К. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий / С. К. Абрамов /– М. : Госстройиздат, 1960. – 293 с.
4. Вендров, С. Л., Роль водохранилищ в изменении природных условий // С. Л. Вендров, А. Б. Авакян, К. Н. Дьяконов, А. Ю. Ретеюм / М. : Изд-во «Знания», 1968. – 47 с.
5. Бейром, С. Г., Методические рекомендации по изучению и прогнозированию подпора подземных вод и переработке берегов водохранилищ Сибири / С. Г. Бейром, Л. Н. Каскевич, И. К. Невечеря, В. М. Широков // СибНИИЭ, Новосибирск, 1972 . – 290 с.
6. Емельнов, А. Г., Методические рекомендации по прогнозированию подтопления берегов водохранилищ и использованию подтопленных земель // А. Г. Емельнов, Д. П. Инаров, Г. Н. Петров, Г. А. Михацлова / ВНИИГ, Ленинград, 1978. – 88 с.
7. Левкевич, В. Е. Гидроморфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Мн. : Право и экономика, 2018. – 143 с.
8. Левкевич, В. Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси / В. Е. Левкевич. – Мн. : БНТУ, 2019. – 172 с.
9. Левкевич, В. Е. Инженерная защита и мониторинг прибрежной зоны водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Мн. : Право и экономика, 2020. – 152 с.
10. Скрипка, Г. И., Беспалова, Л. А., Ивлиева, О. В., Сапрыгин, В. В., Филатов, А. А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга положения бровки высоких берегов водохранилищ. // Водные ресурсы России: современное состояние и управление : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. г. Сочи 08–14 октября 2018 г. – Новочеркасск : ЛИК, 2018. – С 298–305.
11. Копосов, Е. В., Соболев, И. С., Ежков, А. Н. Прогнозирование абразионной и оползневой опасности побережий Волжских водохранилищ // Гидравлика. Инженерная гидрология. Гидротехническое строительство. Нижний Новгород. Вестник МГСУ. – 2013. – № 6. – С. 170–176.
12. Болсуновский, М. А. Система спутников ДЗЗ SPOT // География. – 2005. – № 3. – С. 19–21