

УДК 528.236.3:528.88:347.214.2
DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-128-138

**Проблемы применения плоских систем координат
при использовании космических снимков Земли
в целях устойчивого функционирования линейных объектов единых
недвижимых комплексов**

А. М. Портнов¹✉, Чжэньфэн Шао², В. Б. Непоклонов¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
г. Москва, Российская Федерация

² Уханьский университет, Ухань, Китайская Народная Республика
e-mail: a.m.portnov@yandex.ru

Аннотация. Рост урбанизированных территорий диктует необходимость использования более «качественных» геоданных, имеющих точностные характеристики, обеспечивающие принятие управленческих решений с минимальными экологическими рисками и экономическими затратами. Накоплен колоссальный опыт применения космических снимков Земли для изучения разрастания урбанизированных территорий и влияния этого процесса как на окружающую среду, так и на функционирования сложных инженерных систем. Одним из аспектов в использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемых в геоцентрических координатах, является необходимость их комбинации с проектами строительства и эксплуатации объектов оперирующими физическими законами и метрическими данными. Это обстоятельство формирует актуальную задачу корректности их сопоставления с данными ДЗЗ. Решение указанной задачи является целью самостоятельного раздела исследований, применимых к эффективному использованию космических снимков Земли, – сохранению идентичности геометрических характеристик объектов в плоскости снимка. В связи с тем, что для большинства случаев невозможно получить эквивалентные значения геометрических величин одних и тех же объектов на поверхности Земли и снимке, следует говорить об использовании возможных процедур приближения. Одним из возможных вариантов является проектирование локальных плоских систем отсчета, имеющих уникальные Geodetic Parameter Dataset, позволяющие реализовывать связь проектируемых инженерных объектов с их представлением на поверхности Земли. В исследовании представлены выводы о возможных погрешностях в геоданных, получаемых с использованием космических снимков Земли, на примере транспортных инженерных объектов и их возможного влияния на эффективность мониторинга урбанизированных территорий. Приведен пример проектирования плоских систем отсчета, имеющих очевидные преимущества относительно используемых как в России, так и Китае.

Ключевые слова: проекционные искажения, наилучшие проекции, мониторинг земель, недвижимые комплексы, учетные системы недвижимости

Введение

Данная тема исследования возникла из констатации того, что Российская Федерация и Китайская Народная Республика приближенно занимают более чем 1/6 часть общей суши Земли (свыше 26 млн кв. км). Для решения ряда национальных задач и международного торгового сотрудничества такие терри-

тории требуют наличия связей в виде инфраструктуры, выраженной значительно протяженными объектами (транспортными коридорами) [1, 2]. Как отмечалось многими исследователями, именно такие объекты определяют значимость работ по созданию систем мониторинга с использованием данных ДЗЗ и придают вес принципам реализации устойчивого развития урбанизированных террито-

рий в научном и, конечно же, прикладном аспекте.

В данной работе мы бы хотели обсудить не только использование данных ДЗЗ в различных областях знаний, но и подчеркнуть значимость интерпретации этих данных для городских служб, эксплуатирующих организаций и в конечном итоге государственных потребностей в рамках реализации устойчивого развития территорий.

Современные мониторинговые системы протяженных объектов невозможно представить без использования информации, полученной с использованием разномасштабных космических снимков. Данный класс информации способен сыграть важнейшую роль в понимании процессов изменения как свойств объектов, так и окружающего пространства. Это касается как природных факторов, отмеченных, например, в работе J. Nichol и M. S. Wong [3], где с использованием космических снимков выявляют до 70 % оползней, так и влияния разрастания урбанизированных территории на температурный баланс локальных территорий [4]. Учитывая функциональную неделимость таких уникальных объектов и принципы устойчивости их функционирования, следует говорить о необходимости создания единой системы координат для всей протяженности транспортных коридоров.

Для классических проекций, ориентированных по меридианам, не представляется возможным описание семейства инженерных сетей произвольно ориентированных и сохраняющих единичный главный масштаб. Решение данной задачи способно улучшить управление системами отсчета координат (CRS) между ГИС и программным обеспечением CAD / BIM, которое было и остается существенной причиной наличия несоответствий при совмещении результатов инженерного проектирования, а также топографической съемки и ситуации на снимках Земной поверхности [5, 6]. Это позволит реализовать пространственное описание объектов на уровне проекционных погрешностей, обеспечивающих их безопасное и экономически эффективное функционирование [7]. К таким показателям возможно отнести, например, требование приемлемости и соразмерности

ошибок в расчетах объемов строительных работ.

Постановка задачи

Для ряда территорий Китая структура урбанизированных территорий (рис. 1, *а*), определяется на уровне взаимной удаленности застроенных земель не более 1 км (рис. 1, *б*). Столь концентрированное распределение естественным образом формирует необходимость оценки влияния эволюции природных факторов и роста застраиваемой территории на транспортные коридоры, связывающие регионы и территориально-экономические комплексы.

Для визуальной оценки степени разрастания урбанизированных территорий нет необходимости в какой-либо тематической обработке космических снимков. Это может сделать каждый желающий, используя открытые геосервисы. Однако вопросы оценки значимости и влияния такого разрастания требуют вычисления пространственных характеристик объектов исследования в соответствующих метрических системах. Такие системы должны позволять с высокой точностью определять изменения геометрических характеристик объектов и явлений местности, а также их взаимную топологию.

Как отмечается в работе [8], разрастание городов находится в явном противоречии с принципами устойчивого землепользования. Использование ДЗЗ в указанном контексте возможно принимать как изучение динамики изменения природной среды, направленной против «урбанизма». Это определяет значимость применения данных ДЗЗ, так как именно эти данные обладают оперативностью и мультимасштабностью, столь необходимыми свойствами для выявления глобальных и локальных изменений эндогенного и экзогенного характера местности.

Помимо информационной нагрузки и обработки, большую роль в эффективном применении данных ДЗЗ играет создание систем пространственного отсчета (рис. 2), которые способны отображать индивидуальные свойства предметов или явлений, идентифицируемых на снимках с точностью их представления на поверхности Земли.

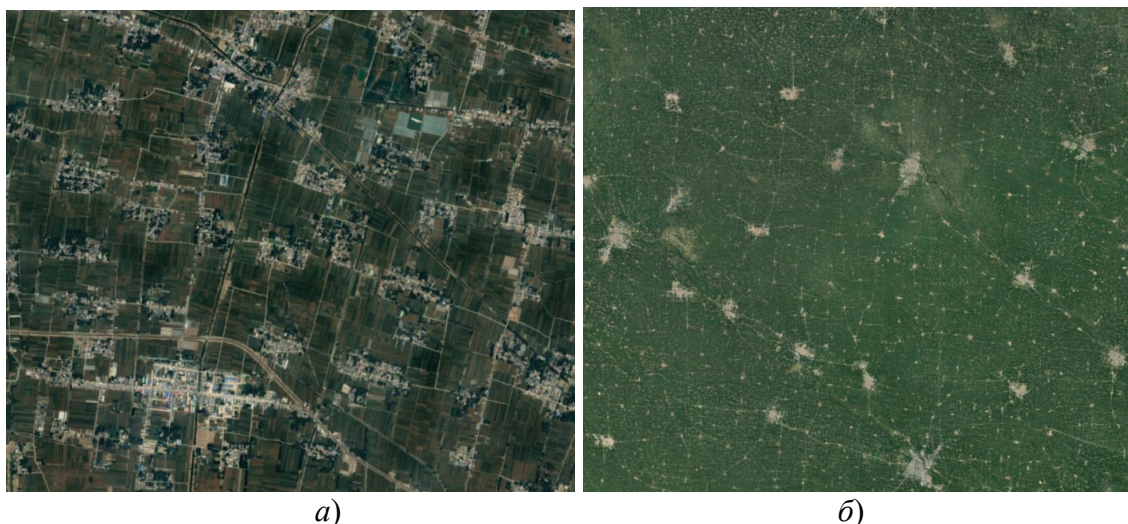


Рис. 1. Пример формирования структур урбанизированных территорий (Китайская Народная Республика, провинция Аньхой): а) локально застроенные территории; б) глобальная структура поселений

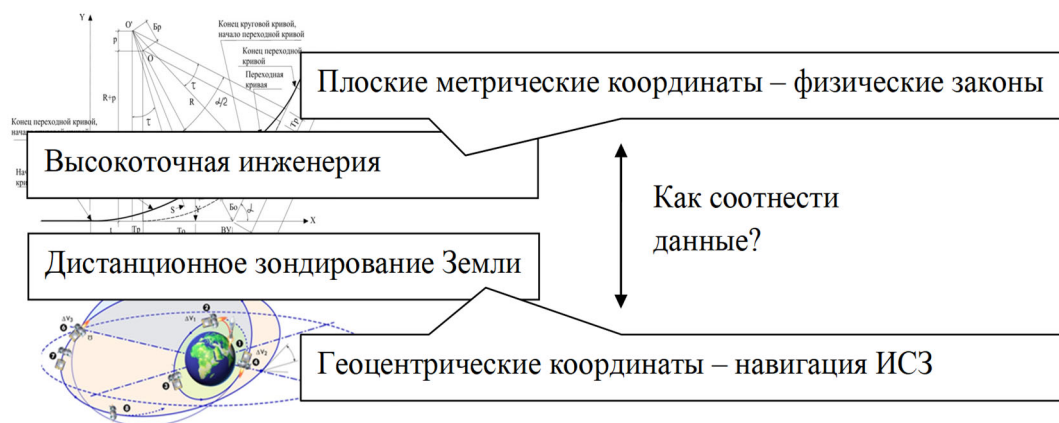


Рис. 2. Соотнесение результатов инженерных изысканий и ДЗЗ

Численные расчеты

В прикладном аспекте мы хотели бы обратить внимание на описательную часть объектов, фиксируемых на космических снимках Земли в контексте формирования систем их координатного описания и привести пример

значимости изыскания таких систем на примере транспортного коридора смешанных пассажирских и грузовых перевозок Hefei – Wuhan (табл. 1). В представленном исследовании протяженность была сокращена до границ городов и составила 313 533,31 м.

Таблица 1

Основные характеристики транспортного коридора Hefei – Wuhan

Линия	Описание маршрута	Предполагаемая скорость, км/ч	Протяженность, км	Дата ввода в эксплуатацию
Hefei – Wuhan	Смешанные перевозки Hefei & Wuhan	350	351	2009–04–01

Наиболее эффективным способом мониторинга является использование многомасштабных изображений, которые позволяют идентифицировать глобальные и локальные изменения. Использование спутниковых снимков Земли чрезвычайно важно для мониторинга эволюции природных и антропогенных объектов. Наиболее важные данные включают увеличение объема стоков и баланс подземных вод, последние характеризуются разнонаправленным движением в результате глобальных и локальных эндогенных и экзогенных процессов.

Мониторинг оценки значимости возможного влияния внешних природных и антропогенных факторов на данный объект проводился с использованием данных Sentinel-2

European Space Agency покрывающих территорию 6-ю снимками.

Для примера в качестве объекта исследования были выбраны, сама трасса с контрольными значениями: ориентировочного угла, протяженности и сформированные два площадных объекта, изменение площадных характеристик которых потенциально может влиять на эксплуатацию данной транспортной системы. В качестве объектов рис. 3 были выбраны территория урбанизации земель, определяемая разрастанием город Macheng и природный горный массив формирующий локальную систему водосбора (границы сформированы с использованием космоснимков).

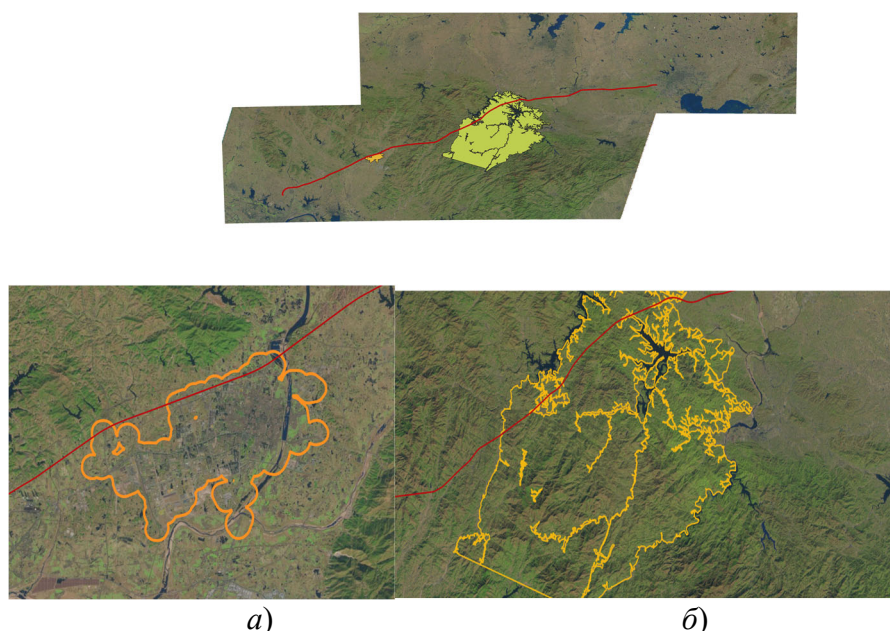


Рис. 3. Схема расположения трассы и двух тестовых объектов:

а) объект мониторинга 1 – территория города Macheng (зона EPSG:4526);

б) объект мониторинга 2 – участок горного массива, образующий местную систему водосбора (зона EPSG:4527)

В качестве оценки соотношения геометрических характеристик объектов на поверхности Земли и в плоскости снимка использована система координат CGCS2000, реализуемая в целях кадастра, инженерно-геодезических изыскания, картографирования территорий Китайской Народной Республики [9, 10]. Параметры системы представлены на рис. 4. Такие системы координат наиболее часто используются в GIS, в том числе и России, где

приняты шести и трехградусные зоны. Последние являются основой для ведения кадастра недвижимости в РФ и имеют значительно увеличенную ширину, ориентируемую по границам муниципальных образований, за счет чего в большинстве случаев следует ожидать недопустимые превышения погрешностей в пространственном описании объектов, находящихся на краю координатной зоны и выходящих за нее.

SPHEROID["CGCS2000",6378137,2
98.257222101,["EPSG","1024"]]
1 CGCS2000 / 3-градусная
зона Gauss-Kruger 38, EPSG:4526,
Территория использования: China –
между 112°30'E и 115°30'E.
2 CGCS2000 / 3-градусная
зона Gauss-Kruger 39, EPSG:4527,
Территория использования: China -
между 115°30'E и 118°30'E.

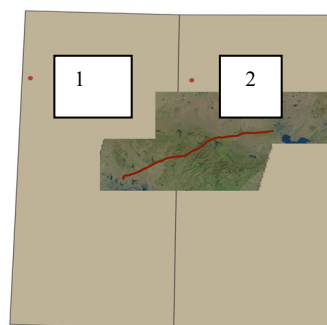


Рис. 4. Схема расположения объекта в границах координатных зон

Для данного примера объект мониторинга расположен в двух координатных зонах CGCS2000 38 и 39. Прикладной задачей исследования являлось сравнение контрольных параметров: протяженности, ориентировочных

углов как направления определенного крайними точками трассы и площади двух выбранных объектов, определяемых в двух системах координат проекционной CGCS2000 и, например, WGS-84, принимаемых за эталон (табл. 2).

Таблица 2

Эталонные значения контролируемых параметров

Система координат	Протяженность линии, м	Азимут, градусы	Площадь объекта 1, кв. м	Площадь объекта 2, кв. м
EPSG 5246 (WGS-84)	313 533,31	67,994	66 333 507	2 932 457 377

В табл. 3 представлены расчетные значения объектов в системе координат CGCS2000.

В табл. 4 указаны расчетные погрешности определенные в ГИС QGIS для контролируемых показателей (табл. 2) в сравнении с WGS-84, принятыми за эталонные.

Соответственно, по данным, представленным в табл. 4, для мониторинга контрольных объектов в координатной системе CGCS2000 будут использованы данные, имеющие следующие погрешности: наибольшая погреш-

ность в азимуте составила 1,394 77 градусов, искажения в протяженности трассы 114,01 м, относительная максимальная погрешность в площади примерно 1 / 5 700. Такие искажения являются недопустимыми согласно ГОСТ Р 59328–2021 (превышают допустимые значения ведения кадастра в 3-градусных зонах). Указанные величины искажений определяют необходимость проектирования плоских систем отсчета, отличных от официально принятых в России и Китае.

Таблица 3

Геометрические характеристики контролируемых объектов

Объект сравнения	Протяженность линии, м	Азимут по точки 1, градусы	Контрольная площадь, кв. м
объект 1 – EPSG 4527	313 647,32	69,389	66 348 318
объект 2 – EPSG 4526	313 622,93	67,829	2 932 203 949

Таблица 4

Погрешности в геометрических характеристиках контрольных объектов учтенных в CGCS2000 относительно EPSG 5246 (WGS-84)

Объект сравнения	Погрешность протяженности, м	Погрешность значения азимута, градусы	Абсолютная погрешность контрольных площадей, кв. м
объект 1 – EPSG 4527	114,01	1,394 77	14 811
объект 2 – EPSG 4526	89,62	0,165 23	511 629

Учитывая значительную протяженность трассы, для данного примера были изменены центр проекции CGCS2000 $114^{\circ}00'E$ and $115^{\circ}30'E$ и $117^{\circ}00'E$ and и предложена единая ось проекции (рис. 5) со следующими параметрами косо́й проекции Меркатора

Latitude of projection centre",30.9161557284197.

Scale factor on initial line",1.00.

Precise description of the research object.

Precise description of the factors of influence.

Latitude of 1st point",30.916156.

Longitude of 1st point",114.302759.

Latitude of 2nd point",31.929939.

Longitude of 2nd point",117.108023.

Latitude of projection centre",30.9161557284197.

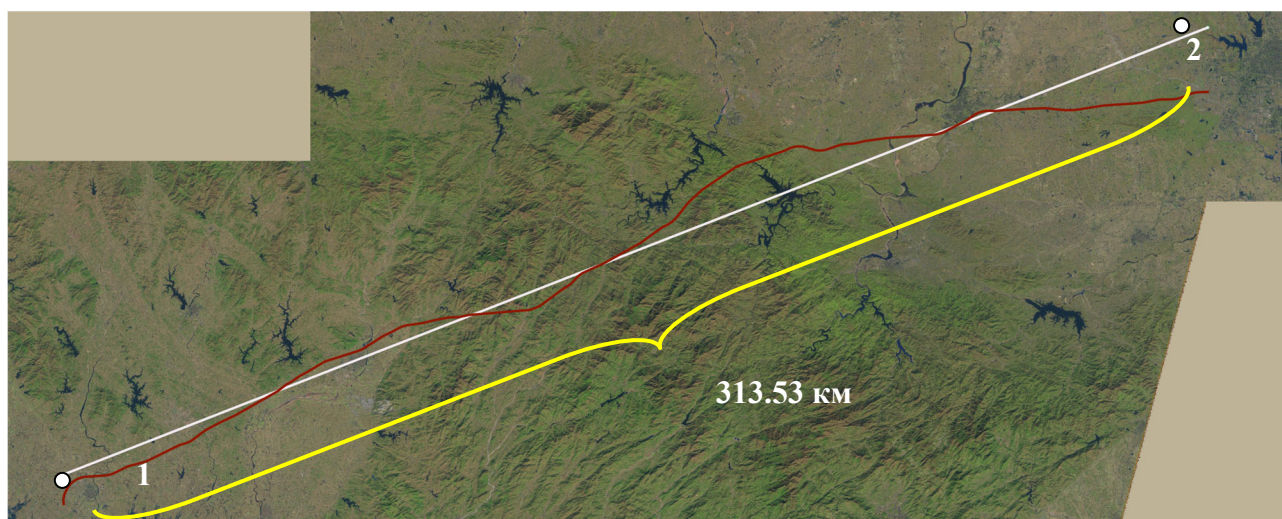


Рис. 5. Схема положения оси проекции (белый) относительно линии железной дороги (красный)

Расчетные геометрические характеристики трассы в предложенной специальной системе координат представлены в табл. 5.

Эффективность применения расчетной плоской системы координат для данного примера демонстрируют величины искажений в сравнении со стандартно применяемой системой отсчета, табл. 6.

Таблица 5

Геометрические характеристики трассы

	Протяженность линии, м	Дирекционный угол, градусы	Контрольная площадь объекта 1, кв. м	Контрольная площадь объекта 2, кв. м
Специальная система координат	313 533,42	67,992	66 333 503	2 932 203 949

Таблица 6

Сравнительные величины погрешностей

Контролируемые параметры	Специальная система координат	CGCS2000	
		EPSG 4526	EPSG 4527
Погрешность протяженности, м	0,11	114,01	89,62
Относительная погрешность протяженности, м	1 / 2 854 545	1 / 2 754	1 / 3 504
Допустимая средняя погрешность протяженности для 3-х зон	1 / 5 000		
Погрешность дирекционного угла, град.	0,002	1,394 77	0,165 23
Абсолютная погрешность площадей для объекта 1, кв. м	4	–	14 811
Абсолютная погрешность значения площади для объекта 2, кв. м	253 428	511 629	–

Обсуждение

Выявленные погрешности на объектах контроля в учтенные в EPSG 4526 или EPSG 4527 указывают на возможность возникновения значимых ошибок при мониторинге объектов и явлений, идентифицируемых с помощью данных ДЗЗ. Такие погрешности (табл. 6), на наш взгляд, могут привести к неоднозначности в решении ряда приклад-

ных задач проектирования и научных исследований. Так, например, в работе [11] исследуется рост городов по радиальным направлениям по заданному азимуту. Соответственно, определяются длины и азимуты для больших расстояний и площадных объектов/явлений разрастания городских территорий. В частности, используется следующая формула для вычисления протяженности городской границы по каждому азимуту [11, формула (1)]:

$$L = \sqrt{(PX_{t+1} - PX_t)^2 + (PY_{t+1} - PY_t)^2},$$

где X, Y – соответствующие метрические координаты точек.

В исследовании [12] формулы (3)–(6) используют координаты центра тяжести различных типов территорий, оперируют метрическими координатами изменения землепользования на сельской и городской окраинах Пекина, имеющими значимые протяженности и площади. В указанных исследованиях авторами не уточняется, в какой системе координат были проведены исследования,

в силу того, что необходимо было показать исключительно основные географические направления эволюции изучаемых объектов.

Для проектных расчетов инженерных факторов, например, показателей водосбережения [13, 14], используются такие данные, как уклон, гидропроводность насыщенного грунта и коэффициент скорости, где также очевидным является возможный факт наличия погрешностей

в оценке площадей поверхностей, обладающих теми или иными гигроскопическими свойствами поверхностей. В целях решения указанных задач авторы [15] используют проектные данные в системе координат Krasovsky_1940_Albers. Соответственно, исходя из приведенных нами расчетных примеров, следует учитывать необходимую существенную коррекцию значений площади водоснабжения.

Представленные примеры свидетельствуют о необходимости проектирования систем координат обеспечивающих возможность использования космических снимков с наименьшими искажениями при переходе к плоским (инженерным) системам отсчета. На наш взгляд, это позволит использовать более качественные данные в научных исследованиях, что может повлиять на принятие управленческих решений.

Заключение

Результатами применения уникальных параметров проекции следует считать:

1) погрешность отклонения азимута на плоскости от его направления на сфероиде не более 0,002 градуса;

2) проекционное искажение для протяженности железнодорожной линии 313 533 м составило не более 0,11 м;

3) относительная погрешность в площади для территории Macheng составила 1/16 999 300, для участка горного массива 1/11 500.

Посредством представленных результатов мы доказываем, что специальные проекции, в данном случае наклонная проекция Меркатора, обеспечивают деформацию направлений на уровне первых секунд, длин линий на уровне десятых долей метра. Также применение специальных проекций позволяет избежать зональности, что также подчеркивается как важный фактор в исследовании D. Abbey и др. [8].

Помимо предлагаемой в данном исследовании наклонной проекции Меркатора, для описания линейных объектов единых недви-

жимых комплексов могут применяться некоторые иные проекционные системы, например: Krovak projection, transverse Mercator, отличная от UTM [9].

На наш взгляд, полученная в результате исследования погрешность в пространственном описании объектов позволит обеспечить получение более точных решений для всего спектра инженерных задач и изучения динамики изменения площадей урбанизированных территорий с применением данных ДЗЗ.

Также хотим отметить следующее.

1. Полученные решения позволяют более точно внедрять механизмы мониторинга, тем самым оценивая результаты взаимодействия урбанизированных и природных территорий.

2. Использование существующих (государственных) систем координат в силу наличия существенных погрешностей в площадях учитываемых объектов, может привести к неоправданному экономическим затратам, например, при ликвидации или предотвращении чрезвычайных ситуаций.

3. Если возможно делать прогнозы на основе более точных данных, почему бы этого не сделать!!!

Благодарности

Выражаю благодарность участникам international conference on «International Research Center for Urban Remote Sensing and Sustainable Development», Wuhan University, People's Republic of China за комментарии и обсуждение глобальных тем использования ДЗЗ в целях устойчивого развития территорий, которые позволили уточнить вопросы, раскрываемые в данной статье. Также автор выражает свою благодарность проф. кафедры кадастра ФГБОУ ВО СГУГиТ Е. И. Авруневу за ценные замечания и предложения по оформлению статьи. Коллектив авторов выражают признательность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку исследования в рамках государственного задания FSFE-2023-0005 (123021300031-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Niu Fangfei, Niu Genliang. Ultra-long-distance pipeline Entity Data CGCS2000 coordinate conversion technology research // 2022 Oil and Gas Exploration Technology Center Station 29th technology seminar papers. – 2022.

2. Ding S., He L., Li P. Oblique Mercator Projection and Its Application to Control Network for High Speed Railway // *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. – 2016. – Vol. 41 (4). – P. 541–546. – DOI 10.13203/j.whugis20130120.
3. Nichol J., Man Sing Wong. Detection and interpretation of landslides using satellite images // *Land Degradation & Development*. – 2005. – Vol. 16.3. – P. 243–255. – DOI 10.1002/ldr.648.
4. Liu X., Ming Y., Liu Y., Yue W., Han G. Influences of landform and urban form factors on urban heat island: Comparative case study between Chengdu and Chongqing // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 820. – P. 153395. – DOI 10.3390/su10061943.
5. Yang Y. Chinese geodetic coordinate system 2000 // *Chinese Science Bulletin*. – 2009. – Vol. 54. – P. 2714–2721. – DOI 10.1007/s11434-009-0342-9.
6. Cheng, P., Cheng, Y., Wang, X. et al. Update China geodetic coordinate frame considering plate motion // *Satellite Navigation*. – 2021. – Vol. 2(1). – P. 2. – DOI 10.1186/s43020-020-00032-w.
7. Liu Xu. Based on the CGCS2000 the establishment of the independent coordinate system [Electronic resource] // *Geospatial information*. – 2021. – Vol. 08. – Mode of access: <https://over-sea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&filename=DXKJ202108012&dbnamer=CJFDLAST2021>.
8. Abbey D., Woolhouse L., Featherstone W. The Oblique Mercator for engineering and survey // *Survey Review*. – 2022. – Vol. 55(392). – P. 1–12. – DOI 10.1080/00396265.2022.2120273.
9. Vonderohe A. P., Dennis M. L. Minimizing Root-Mean-Square Linear Distortion in Common Conformal Map Projections // *Journal of Surveying Engineering*. – 2022. – DOI 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000381.
10. Behnisch M., Bharat A., Krüger T., Jaeger J. A. G. Rapid rise in urban sprawl: Global hotspots and trends since 1990 // *PLOS Sustainability and Transformation*. – 2022. – Vol. 1(11). – P. e0000034. – DOI 10.1371/journal.pstr.0000034.
11. He Q., Tan R., Gao Y., Zhang M., Xie P., Liu Y. Modeling urban growth boundary based on the evaluation of the extension potential: A case study of Wuhan city in China // *Habitat International*. – 2016. – Vol. 72. – P. 57–65. – DOI 10.1016/j.habitatint.2016.11.006.
12. Feng C., Zhang H., Xiao L., Guo Y. Land Use Change and Its Driving Factors in the Rural–Urban Fringe of Beijing: A Production–Living–Ecological Perspective // *Land*. – 2022. – Vol. 11(2). – P. 314. – DOI 10.3390/land11020314.
13. Hamel P., Guswa A. J. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2015. – Vol. 19 (2). – P. 839–853. – DOI 10.5194/hess-19-839-2015.
14. Bao Y., Li T., Liu H., Ma T., Wang H., Liu K., Shen X., Liu X. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi province by InVEST model // *Geographical Research*. – 2016. – Vol. 35, No. 4. – P. 664–676.
15. Li M., Liang D., Xia J., Song J., Cheng D., Wu J., Cao Y., Sun H., Li Q. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – Vol. 286. – P. 112212. – DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112212.

Об авторах

Алексей Михайлович Портнов – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей геодезии.

Чжэньфэн Шао – профессор, руководитель Международного исследовательского центра дистанционного зондирования и устойчивого развития городов.

Виктор Борисович Непоклонов – доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры высшей геодезии.

Получено 13.11.2023

© А. М. Портнов, Чжэньфэн Шао, В. Б. Непоклонов, 2024

Problems of using plane coordinate systems when using satellite images of the Earth for the purpose of sustainable functioning of linear objects of unified real estate complexes

A. M. Portnov¹✉, Zhenfeng Shao², V. B. Nepoklonov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAİK), Moscow, Russian Federation

² Wuhan University (WHU), Wuhan, People's Republic of China

e-mail: a.m.portnov@yandex.ru

Abstract. Growing urbanized areas dictate the need for more "high-quality" geodata with precision characteristics that ensure management decisions with minimal environmental risks and economic costs. A colossal experience has been accumulated in the use of satellite images of the Earth to study the sprawl of urbanized territories and the impact of this process both on the environment and the functioning of complex engineering systems. One of the aspects in the use of remote sensing (RS) data obtained in geocentric coordinates is the need to combine them with the design data of all, without exception, facilities within the framework of physical laws of construction and operation of facilities handling the metric data. This situation leads to an actual problem of correctness of their comparison with RS data. The solution of the specified problem is the purpose of an independent line of research applicable to effective use of space images of the Earth - preservation of identity of geometrical characteristics of objects in the image plane. Due to the fact that for most cases it is impossible to obtain equivalent values of geometric parameters of the same object both on the Earth surface and an image, we should talk about the use of possible approximation procedures. One of the possible options is to design a local planar reference system with unique Geodetic Parameter Dataset, which allows one to implement the tie of engineering objects under design with their representation on the Earth's surface. The study presents conclusions about possible errors in geodata, obtained from Earth satellite images of transport engineering facilities, and their possible impact on the effectiveness of monitoring urbanized areas. An example of designing a plane reference system with obvious advantages over those currently used both in Russia and China is given.

Keywords: projection distortions, the best projections, land monitoring, real estate complexes, real estate accounting systems

REFERENCES

1. Niu Fangfei, & Niu Genliang. (2022). Ultra-long-distance pipeline Entity Data CGCS2000 coordinate conversion technology research. *2022 Oil and Gas Exploration Technology Center Station 29th technology seminar papers*.
2. Ding, S., He, L., & Li, P. (2016). Oblique Mercator Projection and Its Application to Control Network for High Speed Railway. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 41(4), 541–546. DOI 10.13203/j.whugis20130120.
3. Nichol, J., & Man Sing Wong. (2005). Detection and interpretation of landslides using satellite images. *Land Degradation & Development*, 16.3, 243–255. DOI 10.1002/ldr.648.
4. Liu, X., Ming, Y., Liu, Y., Yue, W., & Han, G. (2022). Influences of landform and urban form factors on urban heat island: Comparative case study between Chengdu and Chongqing. *Science of the Total Environment*, 820, P. 153395. DOI 10.3390/su10061943.
5. Yang, Y. (2009). Chinese geodetic coordinate system 2000. *Chinese Science Bulletin*, 54, 2714–2721. DOI 10.1007/s11434-009-0342-9.
6. Cheng, P., Cheng, Y., Wang, X., & et al. (2021). Update China geodetic coordinate frame considering plate motion. *Satellite Navigation*, 2(1), P. 2. DOI 10.1186/s43020-020-00032-w.
7. Liu Xu. (2021). Based on the CGCS2000 the establishment of the independent coordinate system. *Geospatial Information*, Vol. 08. Retrieved from <https://oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&filename=DXKJ202108012&dbname=CJFDLAST2021>.

8. Abbey, D., Woolhouse, L., & Featherstone, W. (2022). The Oblique Mercator for engineering and survey. *Survey Review*, 55(392), 1–12. DOI 10.1080/00396265.2022.2120273.
9. Vonderohe, A. P., & Dennis, M. L. (2022). Minimizing Root-Mean-Square Linear Distortion in Common Conformal Map Projections. *Journal of Surveying Engineering*. DOI 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000381.
10. Behnisch, M., Bharat, A., Krüger, T., & Jaeger, J. A. G. (2022). Rapid rise in urban sprawl: Global hotspots and trends since 1990. *PLOS Sustainability and Transformation*, 1(11), P. e0000034. DOI 10.1371/journal.pstr.0000034.
11. He, Q., Tan, R., Gao, Y., Zhang, M., Xie, P., & Liu, Y. (2016). Modeling urban growth boundary based on the evaluation of the extension potential: A case study of Wuhan city in China. *Habitat International*, 72, 57–65. DOI 10.1016/j.habitatint.2016.11.006.
12. Feng, C., Zhang, H., Xiao, L., & Guo, Y. (2022). Land Use Change and Its Driving Factors in the Rural–Urban Fringe of Beijing: A Production–Living–Ecological Perspective. *Land*, 11(2), P. 314. DOI 10.3390/land11020314.
13. Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 839–853. DOI 10.5194/hess-19-839-2015.
14. Bao, Y., Li, T., Liu, H., Ma, T., Wang, H., Liu, K., Shen, X., & Liu, X. (2016). Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi province by InVEST model. *Geographical Research*, 35(4), 664–676.
15. Li, M., Liang, D., Xia, J., Song, J., Cheng, D., Wu, J., Cao, Y., Sun, H., & Li, Q. (2021). Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model. *Journal of Environmental Management*, 286, P. 112212. DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112212.

Author details

Aleksei M. Portnov – Ph. D., Associate Professor, Department of Higher Geodesy.

Zhenfeng Shao – Professor, Chief International Research Center for Urban Remote Sensing and Sustainable Development.

Viktor B. Nepoklonov – D. Sc., Chief Researcher, Professor, Department of Higher Geodesy.

Received 13.11.2023

© A. M. Portnov, Zhenfeng Shao, V. B. Nepoklonov, 2024