и требуемой точности измерений при решении проблем ДЗЗ. Вместе с тем отмечена необходимость совершенствования нормативно-правовой и нормативно-технической базы ДЗЗ в части метрологии, а также необходимость активизации работ по международным сличениям национальных эталонов Украины с эталонами других стран.

Список литературы


1. *Пудовкин О.Л.* Дистанционное зондирование Земли из космоса: прикладные задачи лесного хозяйства / О.Л. Пудовкин. – М., 2013. – 205 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://magru.net/pubs/3944/Distantsionnoe_zondirovanie_Zemli_iz_kosmosa_prikladnye_zadachi_lesnogo_hozyaystva
2. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://kcdb.bipm.org/
3. *Мишев Д.* Дистанционные исследования Земли из космоса: пер. с болг. / Д. Мишев; под ред. Я.Л. Зимана. – М.: Мир, 1985. – 232 с.
4. *Чепыженко А.А.* Мультиспектральные космические съемки и контактные измерения параметров водной среды в Керченском проливе / А.А. Чепыженко, А.И. Чепыженко, В.М. Кушнир // Наст. журнал. – С. 32–36.
5. *Кошелев А.В.* Определение основных таксационно-мелиоративных показателей лесных полос на основе данных дистанционного зондирования / А.В. Кошелев // Наст. журнал. – С. 43–45.
6. Про застосування ультрафіолетової поляриметрії для супутникових досліджень стратосферного аерозолю Землі / О.В. Мороженко, П.В. Неводовський, А.П. Відьмаченко [та ін.] // Наст. журнал. – С. 28–31.
7. Критерии оценки результатов летных испытаний РСА космического базирования / Л.М. Атрошенко, А.Н. Горобец, Н.Н. Горобец [и др.] // Наст. журнал. – С. 51–56.
8. Полигоны ДЗЗ в Украине: современное состояние и направления дальнейших исследований и разработок / В.И. Лялько, М.А. Попов, С.А. Станкевич [и др.] // Наст. журнал. – С. 15–27.
9. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=55
10. Эталоны / под ред. Ю.Ф. Павленко. – Харьков: ННЦ "Институт метрологии", 2011. – 72 с.
11. Метод синхронізації рознесених у просторі генераторів для визначення релятивістського геоїда з використанням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем / В. Романько, О. Прокопов, П. Неєжмаков [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. 1 (23). – С. 77–83.
12. Анализ возможности использования 3-частотных ГНСС-измерений для восстановления пространственной структуры магнитного поля Земли / Т. Чепиль, А. Олейник, А. Прокопов, И. Тревого // Там же. – 2009. – Вып. 1 (17). – С. 132–136.


УДК 004-6:910.1:51-7

# ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

***А.К. Черкашин,*** *доктор географических наук, профессор геоинформатики, заведующий лабораторией Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Российская Федерация*

*Сформулирована система понятий и аксиом метрологии на основе специальной теории информатики с двумя системными интерпретациями – качественной (общей) и количественной (частной). Познание и измерение рассматриваются как особый тип изменения – сравнения информации. Количественная теория информатики предлагает дифференциальные уравнения прямых и косвенных измерений. Географическая точность обеспечивается полнотой учета всех факторов, определяющих местную специфику наблюдения пространственных закономерностей, поэтому в расчетах принимается во внимание различие характеристик геосистемы и ее среды.*

*The system of concepts and axioms of metrology is formulated on the basis of the special theory of informatics with two system interpretations: qualitative (general) and quantitative ones. The cognition and measurement are considered as a special type of change – comparing of information. The quantitative theory of informatics offers differential equations of direct and indirect measurements. The geographical accuracy is ensured by full consideration of all factors determining the local feature of observation of spatial regularities, therefore the difference in characteristics of geosystem and its environment is taken into account in the calculations.*

## Введение

Как указывается в большинстве изданий, теоретическая метрология и метрологическая практика основываются на понятиях единства и точности измерений. Точность связана с минимизацией погрешности определения постоянных истинных значений, а единство характеризуется постоянством единиц измерений (первичных эталонов) и допустимой погрешностью результатов прямых измерений физических величин. Физические измерения формируют однородные ряды данных, которые статистически обрабатываются для получения ожидаемого значения истинных величин и погрешностей их измерения.

Эти базовые истины метрологии связывают ее с научной информатикой и гносеологией как теорией познания, нацеленной на получение достоверного и истинного знания. Подразумевается соответствие количественных метрологических моделей измерения всеобщим качественным законам познания. Опосредующим звеном между этими исследовательскими подходами в некотором смысле является квалиметрия, задача которой состоит в количественной оценке качества. Информация понимается не просто в техническом смысле как мера разнообразия, изменчивости оцениваемых параметров системы, а как разноуровневое знание от данных (результатов измерений и расчетов) и сформированных на их основе знаний о действительности до моделей, теорий и метатеоретических построений, находящих отражение в научных публикациях и исследуемых в научной информатике. В этом наборе задач важное место отводится метрологическому моделированию для создания и реализации методов измерения и расчетов требуемых показателей на их основе. Развитие данного направления моделирования требует разработки соответствующих теоретических представлений, учета результатов других наук и обобщения опыта прямых и косвенных измерений в специальных областях знаний.

Особенность исторических и географических исследований – работа с уникальными данными, которые проявляются один раз и только в конкретном месте. Обычно возможно лишь однократное, динамическое измерение таких показателей, значения которых формируются в виде временных и пространственных рядов данных при особом стечении обстоятельств. В практике географических исследований и картографирования большое распространение получили цифровые многозональные космические снимки – результаты измерения интенсивности отраженного подстилающей поверхностью Земли электромагнитного излучения с помощью разных сканирующих технических устройств. Обработка таких пространственно-временных измерений отличается от классических статистических методов метрологии и направлена на выделение (косвенное измерение и качественную оценку) существенных свойств, необходимых не только для геоинформационного отображения пространственных данных, но и построения оценочных и синтетических карт разного тематического содержания типа ландшафтных карт и их специальных интерпретаций. При этом происходят последовательное переотражение измеренных значений разных величин, модельный анализ и синтез на их основе новых знаний. Здесь используются методы географической квалиметрии и эпистемологии, существенной стороной которых является учет особенностей географической среды реализации наблюдаемых процессов и явлений.

Географическое измерение имеет свою специфику, выраженную в полноте и комплексности отражения свойств территории [1, 2]. Связанная с этим географическая точность пространственных данных в общем случае обеспечивается разнообразием измеряемых физических показателей [3], в частности, с использованием метода комплексной ординации [4] – одновременным измерением и наблюдением за состоянием и изменением географических характеристик геосистем разных местоположений с целью выяснения взаимосвязей между компонентами природной среды и выявления природных режимов. В настоящее время для этого применяются измерительные приборы, работающие на полигонах стационаров в автоматическом режиме с концентрацией информации на компьютерах в цифровом виде. В итоге накапливается массовый материал пространственно-координированных данных, для обработки которых необходимы адекватные математические модели и методы. Они должны обеспечивать анализ неоднородных динамических (нестатистических) рядов данных совместных однократных многомерных измерений для вычисления относительных величин для сравнительно-географических исследований территориальных комплексов.

Географическая точность обеспечивается также многоаспектностью научных подходов к изучению природы, хозяйства и населения территории, что формализовано в методологии полисистемного моделирования [5]. Фиксируется необходимость многообразия теоретических оснований для познания объекта, разных базовых понятий и аксиом для объяснения связей и изменений его характеристик с различных точек зрения. Причем все многообразие данных о территории рассматривается как инвариант изучаемого объекта относительно его различных научных интерпретаций. В настоящее время этот инвариантный информационный объект воплощается в виде базы данных геоинформационных систем (ГИС), визуализируемых после обработки в виде карт разного тематического содержания.

Наглядным примером различия теоретических подходов являются метрологическая, квалиметрическая, научно-информационная и гносеологическая интерпретации измерения. Метрология основана на измерении физических величин и предполагает знание физических законов, использование соответствующих технических средств. Квалиметрия занимается экспертной и количественной оценкой качества объектов по измеренным характеристикам их свойств, в частности, через расчет интегральных показателей качества. Общенаучный подход рассматривает измерение как частный процесс и результат научного опыта (наблюдения, измерения, эксперимента), порождающего элементарное знание (данные). Гносеологический аспект представляет измерение еще шире в виде следа отражения объекта в субъекте познания, например, следов прежних биосфер в последовательности геологических (гносеологических) отложений. Каждый из этих теоретических взглядов предполагает существование собственной независимой системы понятий и аксиом, сопоставимых с понятиями и аксиомами других теорий.

Предприняты многочисленные попытки создания разных систем аксиом метрологии [6–12]. В.Ш. Сулаберидзе [13] провел критический анализ предложенных утверждений, по результатам которого создана сравнительная схема разных аксиоматических систем и выделены аксиомы [7–10], раскрывающие сущность метрологии как науки об отображении характеристик объектов действительности во множестве значений измеряемых величин. Вместе с тем, им ставится под сомнение возможность создания завершенной системы аксиом метрологии и дедуктивного вывода знаний на ее основе. Обращается внимание на опасность расширенной трактовки основных понятий метрологии и включения в ее состав квалиметрии.

Успешное развитие теоретической метрологии невозможно без тесной связи с методами математической статистики, применяемыми при обработке результатов измерений. Предполагается [14], что в новой парадигме статистики особое внимание будет уделяться методологическому и теоретическому уровню исследований, применению математического моделирования для создания методов обработки больших неоднородных массивов данных, адаптации методов к решению конкретных задач. Такая ориентация исследований соответствует проблемам развития геоинформатики, формирования доказательной географии, основанной на количественном анализе пространственных данных физических и нефизических измерений.

## Теории и модели

Полисистемная интерпретация процесса измерения предполагает наличие нескольких независимых теорий и соответствующих систем базовых понятий и аксиом, описывающих в специальных терминах явление с разных сторон. На первый взгляд может показаться, что одни теории являются более общими, а другие – частными, следующими из общих теорий. Однако это различие связано лишь с уровнем осмысления соответствующих системных понятий, поэтому специальное знание оказывается также универсальным и всеохватывающим, как и общее, несмотря на его применение для решения конкретных задач. Например, познание как отражение реальности или инструментальное измерение физических величин возможны всегда и везде, что определяет сквозной характер соответствующих действий. Вместе с тем, действия измерения можно проинтерпретировать как факт познания, а отражение осуществить с помощью измерения. Возникает важная проблема перераспределения знаний по независимым теориям – расслоение знаний – и доказательства существования связи знаний внутри теории и между альтернативными теориями.

Теория познания создается в терминах общей теории отражения [15, 16] как интерпретация аксиом общей теории систем, представляющих законы онтологии – учения о существовании мира как объективной реальности. Базовые онтологические законы

$$1)\ S \equiv C;\quad 2)\ \Delta S \equiv C;\quad 3)\ \Delta S_i \equiv D_i \qquad (1)$$

утверждают факты: 1) существования мира $S$; 2) существования его изменения (движения) $\Delta S$; 3) равенство всяких $i$ изменений $\Delta S_i$ порождающим их действиям $D_i$ (борьбе противоположностей). Универсальная система $S$ объединяет системы разного рода $S_i$, универсальное изменение $\Delta S$ – все изменения $\Delta S_i$, а универсальное действие – все возможные действия $\Delta D_i$. Существование $C$ трактуется как инвариантное фундаментальное качество общей теории систем, что объективно сохраняется в разных системах отсчета, относительно систем разного рода и их изменений на подобии свойства сохранения законов физики и скорости света во всех реальных, инерциальных и неинерциальных системах отсчета.

*Системы отражения* (познания) являются системами особого рода со специальным пониманием существования, изменения и действия. Первая и вторая аксиомы постулируют существование универсальных систем отражения и их изменений, третья – тождественную связь $\Delta S_i \equiv D_i(S)$ образа (следа) отражения прообраза (объекта), в общем случае свойств всего мира $S$, и оператора преобразования $D_i(S)$. Оператор отражения здесь определяется как линейный оператор $D_i(S) \equiv D_i(S_1 + S_2) = D_i(S_1) + D_i(S_2)$, то есть отражение независимых частей объединяется в отражении целого. Это происходит примерно так, как складываются векторы силы, порождающие следы физических изменений, или как ошибки косвенных измерений определяются по взвешенной сумме ошибок прямых измерений независимых величин. Линейность операторов обеспечивают его аддитивные и мультипликативные свойства, что существенно при операции измерения, например, длины линии с помощью эталона размера, когда величина эталона умножается, чтобы получить значения длины разных отрезков, а размеры отрезков складываются для определения размера всей линии. Площади, объемы, массы, энергии и знания также прирастают аддитивно, дополнительно к уже существующим значениям величин. Кроме того, научная информация обладает способностью множиться путем копирования.

В теории отражения мерой универсальности существования является абсолютная истина $C$. Согласно аксиоме (1.1) $S \equiv C$ – вся система отражения объективно существующего мира абсолютно истинна, то есть мир потенциально познаваем. Относительная истина оценивает частные отражения $\Delta S_i$ в форме изменений $S_i$. Совокупность изменений $\Delta S_i$ всех $S_i$ формирует универсальную относительную истину $\Delta S$ как изменение отражения мира $S$. Согласно (1.2) новое отражение реальности $\Delta S$ также есть абсолютная истина $\Delta S \equiv C$, поэтому всякая относительная истина есть часть истины абсолютной и только в абсолютном варианте совпадает с ней $\Delta S \equiv C$.

Согласно аксиоме (1.3) изменение-отражение объекта $\Delta S_i$ связано с индивидуальным действием $D_i(S)$ на него всего мира $S$, и для изменения двух систем справедливо $\Delta S_i \equiv D_i(S)$; $\Delta S_j \equiv D_j(S)$, откуда, выделив $S \equiv D_i^{-1}(\Delta S_i)$, получаем $\Delta S_j \equiv D_j\, D_i^{-1}(\Delta S_i) \equiv D_{ij}(\Delta S_i)$ – парное соответствие изменений при отражении. Серия последовательных прямых $D_i$ и обратных $D_i^{-1}$ отображений формирует группу преобразований, единицей которой является тождественное преобразование $D = E$. Согласно утверждениям (1.2) и (1.3) тождественное преобразование $D$ является универсальным $\Delta S \equiv D(\Delta S) \equiv C \equiv S \equiv D(S)$, порождающим абсолютную истину. Примером такой абсолютной формы отражения является точное истинное значение измеряемой величины. Поскольку тождественное (истинное) отражение в данном контексте является универсальным, оно локально достижимо только в экстремальном случае $\Delta S \equiv D(\Delta S)$, а во всех остальных случаях можно говорить только о неточной относительной оценке.

Всякая последовательность отражений $D_i$ формирует группу преобразований, произведение которых обладает коммутативными свойствами, и произведение всех действий отражения создает универсальное истинное преобразование $D = E$, существование которого следует из первой и второй аксиомы при $C = E$, то есть путем последовательных переотражений можно восстановить образ реального мира $D(S) = S$.

Согласно теореме Кэли [17] любая группа $S$ изоморфна подгруппе группы перестановок множества элементов этой группы $s \in S$. Группа перестановок действует на множестве упорядоченных позиций (расстановок элементов множества), переводя одни элементы в другие, например, при симметричном преобразовании вершин правильного треугольника в себя. В этом смысле группа перестановок является универсальной симметрической группой действий, моделями которых являются графы Кэли и матричное представление групп преобразований. Тогда универсальную конструкцию $S$ следует понимать как результат любой перестановки ($D_i : S \to S$) образов элементов реальности $S$. Действие $D_i$ становится отношением сравнения исходной и преобразованной структуры, что выражается в изменениях $\Delta S_i$.

*Метрологическая интерпретация* гносеологических аксиом (1) рассматривает изменение как измерение, а точнее – количественное сравнение определенного типа, например, измерение как сравнение величины с эталоном, эталона с нулем, оценка погрешности как сравнение действительного и истинного значения величины. В этом смысле отождествление измерения со сравнением есть определение, а не базовый постулат метрологии [12]. Важно то, что такие сравнения возникают как результат симметрических изменений количественных величин и поэтому должны отражать действия непрерывных преобразований, формирующих группы Ли.

Некоторые из предлагаемых аксиом метрологии постулируют существование необходимых для измерения качеств, например, наличие априорной информации, эталонов измерения и даже конкретных объектов и средств измерения [6, 12]. В силу аксиом теории отражения (1) вся информация, влияющая на результаты измерения, содержится в $S$ или ее равнозначимых частях $\Delta S$, которые можно рассматривать как наборы априорно независимых величин, сравнение результатов измерения которых позволяет рассчитывать новые величины и находить новые законы взаимосвязи. Всё это гносеологические принципы познания, лежащие вне специальной аксиоматики метрологии. Только переход на количественный уровень представления измерений позволяет получить необходимые для метрологии ограничения и соотношения. К таким ограничениям относится, например, требование постоянства значения единицы измерения.

Проинтерпретируем $S$ как множество независимых положительных величин $x = \{x_i\}$ и результатов их измерений $y = \{y_i\}$, для которых установлены разные виды сравнений $\Delta x$ и $\Delta y$, а также максимальные $x_{max}$, $y_{max}$ и минимальные $\Delta x_{min}$, $\Delta y_{min}$ значения. Сравнения могут принимать отрицательные значения, например, температура по шкале Цельсия. Естественно определить отрезки $[0, y_{max}]$ как исходную шкалу измерения соответствующих величин $x$, а $\Delta y_{min}$ считать единицей измерения. В этих терминах основное уравнение измерения выглядит как отношение симметрии (пропорции) величин: $y/\Delta y_{min} = x/\Delta x_{min}$, или в разностной форме $\Delta y/\Delta y_{min} = \Delta x/\Delta x_{min}$. Ошибки в измерении $\Delta y$ будут определены только ошибками применения эталона $\Delta y_{min}$; требование эквивалентности $\Delta x_{min} = \Delta y_{min} = const$ является главным постулатом обеспечения единства измерений. Положение $n = y/\Delta y_{min}$ величины $x$ на номинальной шкале измерений не выходит за пределы значений $N = y_{max}/\Delta y_{min} \geq 1$. Используемая единица измерения $\Delta y_{min}$ устанавливает симметрию между аналоговым $y$ и числовым $n$ значением величины.

Сравнивая основное уравнение измерения с парным соответствием $\Delta S_j \equiv D_{ij}(\Delta S_i)$, находим, что интерпретацией действия $D_{ij}(\Delta S_i)$ является выражение $\Delta y_{min}\Delta x/\Delta x_{min}$ – результат измерения пропорционален исходному сравнению $\Delta x$ ($a = y_{min}/\Delta x_{min}$ – соотношение действительных (номинальных) и истинных эталонов). В соответствии с этим уточним формулу действия $D_{ij}(\Delta S_i) = D_{0ij}(\Delta S_i)\cdot\Delta S_i$, где $D_{0ij}$ – относительное действие (преобразование), равное $D_{0ij} = \Delta y_{min}/\Delta x_{min}$. Тождественное преобразование $D_{0ij} = 1$ при равенстве мер $\Delta x_{min} = \Delta y_{min}$ дает однозначное соответствие действительных и истинных значений. Очевидно, справедливы неравенства $\Delta x_{max} \geq \Delta y_{max} \geq \Delta y \geq \Delta y_{min} \geq \Delta x_{min}$ – все измеренные значения сравнения $\Delta y$ лежат на шкале между минимальными и максимальными истинными значениями величин.

По аналогии с системой уравнений (1), с учетом сделанных замечаний вводится базовая система уравнений метрологии:

$$1)\ x = c_{max};\ 2)\ \Delta x = c_{min};\ 3)\ \Delta y_i = D_{0i}(\Delta y)\Delta y\,. \qquad (2)$$

Здесь $c_{max} = \{c_{i\,max}\}, c_{min} = \{c_{i\,min}\}$ – наборы (векторы) констант для соответствующих величин. Аксиомы (2.1) и (2.2) утверждают, что такие минимальные и максимальные значения существуют. Аксиома (2.3) постулирует связь результата конкретного измерения $\Delta y_i$ со всеми исходными $\Delta y = \Delta x$ и измеренными $\Delta y$ величинами. Оператор отображения $D_{0i}(\Delta y): \Delta y \to \Delta y_i$ соответствует процедуре прямого ($\Delta y = \Delta x$) и косвенного измерения, включая и процедуры переработки информации. Например, при $D_{0i}(\Delta y) = 1$ речь идет о точных измерениях (преобразованиях), в частности, в основном уравнении измерения $\Delta y = \Delta x$. Единичный оператор может соответствовать сложным уравнениям преобразования переменных величин, что покажем далее. Операторы $D_{0i}(\Delta y)$ образуют группу операторов последовательных преобразований, соответствующих действиям отражения, происходящим непосредственно в природе или обществе, а также в процедурах измерения и переработки информации. Наглядный пример [16, 18] – последовательность произведений определителей Якоби $J_k$ по формуле Бине-Коши, учитывающих отображение локальных свойств подстилающей поверхности Земли в яркостных характеристиках цифровых снимков разных каналов и отображающих в одном показателе связность этих свойств: $\Delta y_i = D_{0i}(\Delta x)\Delta x = J_1(\Delta x)J_2\Delta x$. Уравнение отражает правило переноса информации из одного природного пространства взаимодействия переменных в другое пространство результатов первичных инструментальных измерений с получением единого показателя, равенство которого $\Delta y_i = 0$ указывает на локальную функциональную зависимость исходных свойств. Этот прием используется при обработке космической информации – выделения при $|\Delta y_i| > 0$ границ, где нарушается функциональная однородность [18].

Обратим внимание, что аксиомы (2.1)–(2.3) справедливы на всех этапах количественных преобразований величин, а процедуры прямого измерения реализуются только на определенном этапе, по результатам которого осуществляются косвенные измерения и все полезные преобразования полученных данных. Процедуры отражения в основном являются процедурами свертки информации, когда по набору первичных величин вычисляются наборы интегральных значений или просто одно значение, характеризующее сложное свойство исследуемой системы. В этом смысле аксиомы (2) постулируют информационный обмен, происходящий в реальности, на границе реальности и информационной сферы (измерение) и в самой информационной среде, в частности, в процессе научных исследований.

### Метрологические модели прямых и косвенных измерений

Основное уравнение измерения запишем в виде равенства сравнений $\Delta y = a\Delta x$, где $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$; переменные величины $x$ и $y$ сравниваются с постоянными значениями $x_0$, $y_0$. Величина $a = y_{min}/\Delta x_{min}$ изменяется от опыта к опыту и является чувствительностью результатов измерения

$$a = \frac{\partial y}{\partial x}$$

по каждой величине $x$. Отсюда при постоянных $x_0$ и $y_0$

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x}\Delta x\,. \qquad (3)$$

Последнее соотношение – это некоторое обобщение основного уравнения измерения. Решением (3) будет равенство $\Delta y = c\Delta x$, где $c$ – произвольная постоянная, значение которой определяется результатами измерений $c = \Delta y/\Delta x$. Отсюда следует, что зависимость (3) произвольна, или статистически случайна, то есть априори невозможно предугадать ее вид в силу неопределенности значения $a = c$. Формула $\Delta y = c\Delta x$ в частном случае является *функцией преобразования измеряемой величины* в электрический параметр прибора, когда $c$ зависит от многих неопределенных причин.

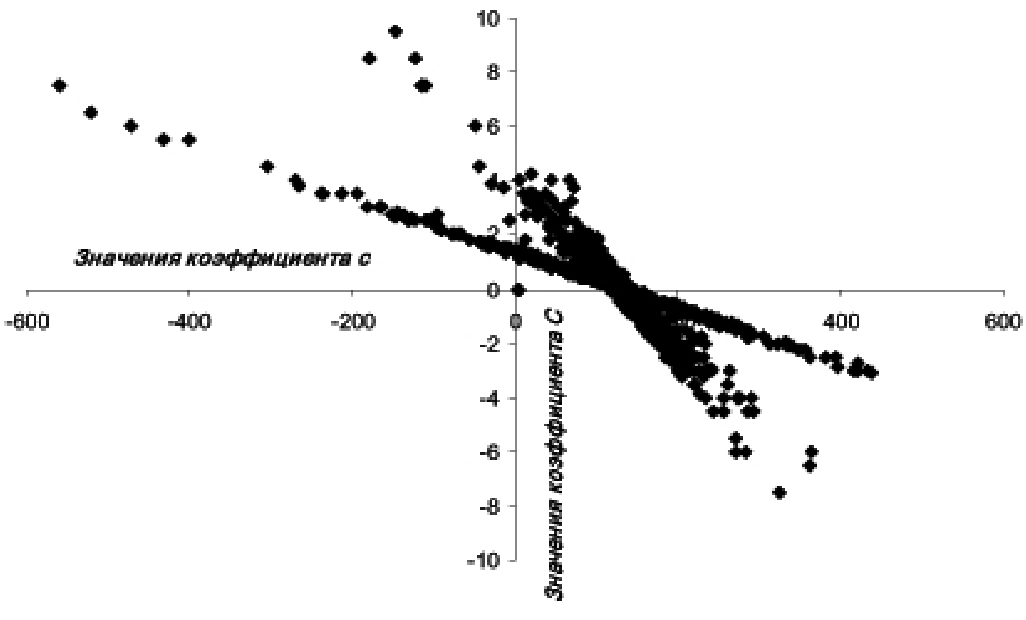
В соотношении (3) линейные операторы дифференцирования образуют группу последовательных преобразований информации

$$\Delta z = \frac{\partial z}{\partial y}\Delta y = \frac{\partial z}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial x}\Delta x$$

с единицей $\partial y / \partial x = 1$ точных измерений, когда $\Delta y = \Delta x$, или $y - y_0 = x - x_0$, где $C = y_0 - x_0$ — неопределенная константа интегрирования, связанная с различием базовых постоянных сравнения, то есть в общем случае также случайная величина. Только при $C = 0$ измерение будет точным. При наличии относительной погрешности $\partial y / \partial x = c \neq 1$ решение (3): $y - y_0 = c(x - x_0)$, $C = y_0 - cx_0$. Отсюда коэффициенты $C$ и $c$ должны быть линейно зависимы. Их значения восстанавливаются по результатам измерений $y(x) = cx + C$ для разных вариантов коэффициентов $C$ и $c$ с последующим их сравнением $C = y_0 - cx_0$ для определения постоянных значений $x_0$ и $y_0$. Уравнение $y - y_0 = c(x - x_0)$ образует пучок линий с центром $(x_0, y_0)$, которые путем поворота (калибровки) при изменении коэффициента $c$ переходят друг в друга, то есть образуют группу Ли с центральной симметрией. Таким образом, возникающие локальные вариации среды, влияющие на точность измерений, можно трактовать как естественные калибровочные преобразования из такой группы.

В сравнениях $\Delta x$ и $\Delta y$ величины $x_0$ и $y_0$ могут интерпретироваться по-разному. В географических исследованиях $x$ и $y$ удобно понимать как номинальные характеристики состояния системы, а $x_0$ и $y_0$ — как среду их реализации. Тогда сравнения $\Delta x$ и $\Delta y$ будут соответствовать реально действующим показателям. Например, $x$ — общая площадь территории, $x_0$ — нелесная площадь (горы, водоемы, поселки), $x - x_0$ — лесная площадь, где могут существовать и восстанавливаться леса. Или, пусть $x$ — номинальный возраст человека, $x - x_0$ — его реальный биологический возраст, отличающийся от номинального в силу лучших условий жизни $x_0$. Такого рода сравнения всегда должны учитываться при обработке результатов наблюдений путем введения базовых параметров $x_0$ и $y_0$, принимающих во внимание влияние среды, то есть воздействие всех неучтенных в измерениях величин. Это также дает возможность при анализе пространственных данных рассчитать индивидуальные характеристики среды $(x_0, y_0)$ и типизировать территорию по этим значениям. В таком подходе заключена одна из основных особенностей географических исследований, определяющих их точность в смысле полноты знаний о среде $(x_0, y_0)$ конкретных местоположений.

Здесь возможны разные формы сравнения (соизмерения). Например, попиксельное сопоставление яркости $x$ и $y$ (инфракрасный канал) растровых геоизображений разных участков горно-таежного ландшафта имеет вид сложной зависимости $y(x)$, которая аппроксимируется в скользящем режиме по нескольким точкам линейной функцией $y(x) = cx + C$ с уравнением линейной связи коэффициентов $C = y_0 - cx_0$ с высоким коэффициентом корреляции $r < -0{,}98$. В границах участков — это связь двух типов (см. рис.) с координатами $(x_0, y_0)$ узловых значений (99, 130) и (31, 129). Это означает, что участок с характеристиками $x$ (гольцовый пояс) состоит из двух разных частей с координатами $x_0$, равными 99 и 31, а второй участок ($y$) — структурно однороден $y_0 \approx 130$ (подгольцовый пояс). В итоге подобие яркости пикселов разных участков описывается двумя вариантами уравнений вида $y - y_0 = c(x - x_0)$, различающимися по набору средовых характеристик $(x_0, y_0)$ с попиксельным изменением коэффициента чувствительности $c$. Подобие, не проявлявшееся в зависимости измеренных величин, прослеживается на уровне общности характеристик среды — гео-




Зависимость коэффициентов $C = y_0 - cx_0$ связи $y(x) = cx + C$ яркости пикселов для двух участков горно-таежного ландшафта систематической погрешности измерений величин, формирующихся в неоднородных условиях. Характеристики ($x_0 - x_{00}$, $y_0 - y_{00}$) являются результатом измерения (сравнения) состояния отдельного участка территории ($x_0$, $y_0$) с состоянием ($x_{00}$, $y_{00}$) участка, выбранного в качестве эталона, например, в системе наземных полигонов для калибровки и валидации спутниковых данных исследования Земли.

Для однотипных территорий в смысле постоянства набора ($x_0$, $y_0$) удается проследить локальную связь измеренных значений $y$ растрового снимка с показателями $x$ состояния наземных геосистем, в частности, яркости пикселов (красный канал) с величиной сомкнутости крон верхнего яруса древостоя $y-76=c(x-25)$, где $C = -25c + 76$, $r = -0{,}82$. Такие соотношения и в целом уравнение (3) касаются прямых измерений величин. Для косвенных более точных измерений необходимо билинейное уравнение зависимости $\Delta y$ от многих переменных $\Delta y = a \bullet \Delta x$, где знак ($\bullet$) соответствует скалярному произведению векторов, $\Delta x = \{\Delta x_i\}$ – набору (вектору) исходных сравнений, $\Delta y$ – одной расчетной смещенной относительно $y_0$ величине, $a = \{a_i\}$ – набору коэффициентов чувствительности $a_i = \partial y / \partial x_i$:

$$\Delta y = a \cdot \Delta x = \sum_{i=1}^{m} a_i \Delta x_i = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial \Delta y}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i = L\Delta y, \qquad (4)$$

$$L = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i .$$

Это дифференциальное уравнение типа уравнения Эйлера для однородных функций $\Delta y(\Delta x)$ первого порядка, что является универсальной моделью взаимосвязи перечисленных переменных. Его универсальность определяется тем, что в нем нет ни одного коэффициента. Неопределенные коэффициенты возникают как результат решения уравнения (4). Кроме того, неопределенной является сама функция $\Delta y(\Delta x)$, конкретный вид которой восстанавливается по частным связям переменных. Одним из вариантов уравнения (4) является соотношение оценки погрешности косвенных измерений $\Delta y$ по погрешностям прямых измерений $\Delta x$.

Действия, заданные скалярным произведением $a \bullet$ или линейным оператором $L$ в (4), линейны и в последовательности применения формируют группу преобразований. Единичным $a = 1$ является преобразование, когда $\Delta y$ точно складывается из суммы измеряемых величин $\Delta x_i$. Оператор $L$ является единичным, поскольку обеспечивает тождественное преобразование $L(\Delta x): \Delta y \to \Delta y, \Delta y = L\Delta y$ на фоне изменения влияющих переменных $\Delta x$. Групповые свойства оператора $L$ обеспечиваются тем, что расчет $\Delta x_i$ по набору независимых факторов $\Delta s_j$ проводится по сходной формуле $\Delta x_i = L(\Delta s)\Delta x_i$. Неединичный оператор соответствует уравнению $K\Delta y = L\Delta y$ для однородных функций $K$-го порядка, применяемых, в частности, в теории размерности физических величин.

Уравнение (4) $\Delta y = L\Delta y$ имеет тривиальное решение $\Delta y = 0$, то есть когда номинальное значение $y$ совпадает с фоновым состоянием $y_0$. Тривиальные решения обычно связаны с равновесными характеристиками, что определяет специфику географического измерения состояния среды по показателям формирующихся в этой среде систем: коренной восстановленной растительности, продуктивности угодий, структуры природопользования, объемов инвестиций, величины бюджета и т. д.

Равенство сравнения $\Delta y = 0$ означает отсутствие информации, например, если величина сигнала канала связи $y$ не отличается от уровня шума $y_0$. Поиск нетривиальных решений – специальная математическая задача, которая решается преобразованием уравнения (4) к эквивалентному симметричному виду:

$$\frac{d\Delta y}{\Delta y} = \frac{d\Delta x_i}{\Delta x_i} = \frac{d\Delta x_i}{\Delta x_j} .$$

Попарно комбинируя равенства, находим $m$ независимых решений – функций первых интегралов $f_i = \Delta y / \Delta x_i$, $f_{ij} = f_i / f_j = \Delta x_i / \Delta x_j$, постоянных на любом решении уравнения (4): $Lf_i = 0$ – преобразование не несет дополнительной информации. Набор функций (первых интегралов) $f = \{f_i\}$ составляет интегральный базис решения дифференциальных уравнений в виде $f_1 = \Phi(f_2, f_3, .., f_m)$. В каждой ситуации функция $f_i$ принимает конкретное значение $c_i$, по совокупности которых можно восстановить эмпирическую зависимость $f_1 = \Phi(f)$.

Первые интегралы устанавливают связь $\Delta y = f_i \Delta x_i$ расчетной величины с первичными переменными, и эта связь, регламентируемая функцией $f_i$, выполняется на всем пространстве действия уравнения (4), то есть отражает некоторый закон сохранения зависимости. Эта зависимость аналогична уравнению (3), которое вытекает из общей постановки задачи косвенного измерения. Константа $c$ становится одним из значений функции $f_i$ в конкретной ситуации измерения. По этой причине анализ пространственных данных необходимо начинать с исследованием парных зависимостей с последующим выяснением связей первых интегралов для восстановления формулы косвенных измерений и расчета.

Отметим, что многие полезные для тематической обработки снимков индексы в виде соотношений яркости разных спектральных зон являются первыми интегралами уравнения (4). Например, нормализованный вегетационный индекс равен NDVI = $(x_1 - x_2)/(x_1 + x_2)$, где $x_1$ – отражение в ближней инфракрасной области спектра, $x_2$ – отражение в красной области спектра; NDVI = $(1 - x_2/x_1)/(1 + x_2/x_1)$ и оператор L NDVI = 0 для $(x_{10}, x_{20}) = (0{,}0)$. Учет при вычислении NDVI условий наблюдения $(x_{10}, x_{20})$ повышает точность оценки данного индекса и определения на его основе состояния растительного покрова.

### Обсуждение результатов и выводы

Географическая точность, помимо точности измерения пространственных данных, обусловлена полнотой учета всех факторов, определяющих местную специфику наблюдения закономерностей. Вследствие этого, помимо характеристик состояния геосистемы в расчетах, принимается во внимание состояние ее среды как систематическое смещение этих характеристик относительно устойчивого центра связей измеряемых величин, что является основанием для типизации местоположений и их соизмерения. Эти и другие закономерности географической метрологии позволяют сформулировать и проверить систему понятий и аксиом метрологии, расширив представления до общей теории отражения, которую в итоге следует считать теорией информатики, имеющей две системные интерпретации — качественную (общую) и количественную.

Общая информатика постулирует потенциальную познаваемость мира в форме существования абсолютной истины, недостижимой, как скорость света, что выражается, в частности, в невозможности измерить точные значения максимальных и минимальных эталонных значений и, как следствие, всех остальных значений. Познание и измерение рассматриваются как особый тип изменения — сравнение, выявление новых знаний, отсюда важность сравнительно географических исследований территорий, а также сопоставление состояний геосистем и их среды. Существенно то, что преобразования информации обладают групповыми свойствами, то есть формируют разветвленные последовательности процедур симметрических преобразований с единичным симметричным действием точного отражения реальности. Аннотированный анализ публикаций по теоретической метрологии показывает, что многие аксиомы измерения [9, 19] скорее относятся к общей информатике, изучающей физические и нефизические явления в одном аспекте, сквозным образом. Причем, при решении задач метрологического моделирования следует отделять собственно информационно-метрологические модели от моделей, отражающих действие специальных физических или иных законов.

В прикладном смысле гораздо интересней количественная теория информатики, предлагающая модели прямых и косвенных измерений, а также метрологические модели расчета новых интегральных величин на основе известных измеренных независимых величин. Случайность трактуется как неопределенность значений коэффициентов в решениях дифференциальных уравнений. Обобщением неопределенных постоянных коэффициентов, характеризующих ситуацию измерения, являются первые интегралы — элементарные неопределенные функции, постоянные на всех решениях исходных уравнений; из этих функций формируются более сложные неопределенные функции, являющиеся решением этих уравнений и принимающие конкретный вид в соответствии с особенностями связей величин в данной ситуации. Все это следствия применения уравнения Эйлера как оператора действия при преобразовании информации. Его обобщением может быть система преобразования многообразий связи одного множества переменных в другое с групповыми свойствами преобразований из групп Ли.

Количественная теория информатики, помимо физической метрологии, включает также науки, имеющие дело с числовой оценкой величин и расчетами на их основе, в частности, разделы квалиметрии и эконометрии по кардиналистскому оцениванию полезности, где широко используются модели и методы, связанные с уравнением Эйлера. Сюда же можно отнести некоторые методы теории размерности и подобия. Эти подходы уже применяются в различных отраслях знания и для их совершенствования будут полезны предлагаемые теории, модели и методы получения и преобразования научной информации.

Список литературы

1. *Баранский Н.Н.* Избранные труды. Научные принципы географии / Н.Н. Баранский. — М.: Мысль, 1980. — 239 с.
2. *Бакланов П.Я.* Географические измерения: виды, шкалы, параметры / П.Я. Бакланов // Украинский географический журнал. — 2013. — № 2. — С. 17—22.
3. *Сочава В.Б.* Опыт количественной оценки природных режимов географических фаций / В.Б. Сочава, В.С. Михеев, В.А. Ряшин // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск, 1965. – Вып. 8. — С. 3–21.
4. *Сочава В.Б.* Теоретическая и прикладная география: избранные труды / В.Б. Сочава. — Новосибирск: Наука, 2005. — 288 с.
5. *Черкашин А.К.* Полисистемное моделирование / А.К. Черкашин. — Новосибирск: Наука, 2005. — 280 с.
6. *Селиванов М.Н.* Развитие основных понятий метрологии / М.Н. Селиванов // Анализ и формализация измерительного эксперимента. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. — С. 23—29.
7. Гносеологические основы исходных положений метрологии / В.А. Грановский, Л.М. Гутнер, Л.И. Довбета, В.В. Лягнев // Измерительная техника. — 1988. — № 1. – С. 6–8.
8. *Грановский В.А.* О формулировке постулатов теории измерений / В.А. Грановский, Л.И. Довбета // Фундаментальные проблемы метрологии. – Л.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1981.
9. *Пиотровский Я.* Теория измерений для инженеров / Я. Пиотровский. — М.: Мир, 1989. — 335 с.

10. *Исаев Л.К.* О месте метрологии в системе наук и еще раз о ее постулатах / Л.К. Исаев // Измерительная техника. – 1993. – № 8. – С. 10–11.
11. *Крысин Ю.М.* Об основных постулатах теории измерений / Ю.М. Крысин // Метрологическое обеспечение измерительных систем. – Пенза: ФГУ "Пензенский ЦСМ", 2004. – С. 23–27.
12. *Шишкин И.Ф.* Теоретическая метрология. Ч. I: Общая теория измерений / И.Ф. Шишкин. – СПб.: ПИТЕР, 2010. – 192 с.
13. *Сулаберидзе В.Ш.* О попытках аксиоматического изложения современной метрологии / В.Ш. Сулаберидзе [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: www.n2.insu.ru/articles/articles.html
14. *Орлов А.И.* Основные черты новой парадигмы математической статистики / А.И. Орлов // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 90 (06). – С. 1–27.
15. *Черкашин А.К.* Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии / А.К. Черкашин. – Новосибирск: Наука, 1997. – 502 с.
16. *Черкашин А.К.* Гносеологические и теоретико-географические аспекты дистанционного зондирования Земли из космоса / А.К. Черкашин // IV Белорусский космический конгресс: материалы. Т. 1. – Минск: Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, 2009. – С. 12–16.
17. *Курош А.Г.* Теория групп / А.Г. Курош. – СПб.: Лань, 2005. – 648 с.
18. *Черкашин А.К.* Выделение границ функционально-однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби / А.К. Черкашин, Е.А. Истомина // География и природные ресурсы. – 2013. – № 1. – С. 157–165.
19. *Цветков Э.И.* Основы математической метрологии / Э.И. Цветков. – СПб.: Политехника, 2005. – 510 с.

УДК 528.855

# ПОЛИГОНЫ ДЗЗ В УКРАИНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

***В.И. Лялько***, *доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Украины, директор Научного центра аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины (ЦАКИЗ), г. Киев*

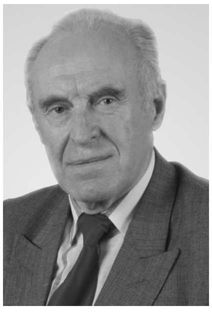
***М.А. Попов***, *доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ЦАКИЗ, г. Киев*

***С.А. Станкевич***, *доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ЦАКИЗ, г. Киев*

***Я.И. Зелык***, *доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института космических исследований (ИКИ) НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев*

***С.В. Черный***, *кандидат технических наук, доцент, руководитель Харьковского центра ИКИ НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков*

***В.А. Яценко***, *доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом ИКИ НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев*


*В.И. Лялько*


*М.А. Попов*


*С.А. Станкевич*


*Я.И. Зелык*


*С.В. Черный*


*В.А. Яценко*

*Рассмотрены концептуальные основы создания сети полигонов ДЗЗ в Украине для калибровки видовой бортовой аппаратуры и валидации спутниковых технологий и данных. Кратко описаны выполненные в последние годы работы по научно-методическому и информационному обеспечению украинских полигонов ДЗЗ.*