

Д. К. Нгуен^{1✉}, О. Н. Николаева²

О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города

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

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
email: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора территориальных единиц картографирования при моделировании экологической обстановки крупного города. На примере Ханоя показано, что использование единственного типа пространственных единиц не позволяет одновременно учитывать природные закономерности миграции загрязняющих веществ, особенности пространственно непрерывных экологических факторов и требования государственного управления. Предлагается многоуровневая система операционных территориальных единиц (ОТЕ), включающая регулярную сетку, речные бассейны и административноправовые единицы. Особое внимание уделяется обоснованию выбора сеточной ОТЕ первого уровня для картографирования пространственно непрерывных факторов городской среды. Выбор формы и размера сетки предлагается выполнять на основе шести критериев: свойств картографируемого явления, качества исходных данных, особенностей моделей и алгоритмов, масштаба картографирования, городской морфологии и чувствительности результатов к проблеме модифицируемой площадной единицы. В качестве базовой сеточной ОТЕ городского уровня предлагается регулярная шестиугольная сетка площадью около 25 га.

Ключевые слова: экологическое картографирование, ОТЕ, Ханой, шестиугольная сетка, речной бассейн, административные границы, МАУР

D. Q. Nguyen^{1✉}, O. N. Nikolaeva²

On the selection of territorial mapping units for modelling the ecological situation of a city

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Abstract. The article examines the problem of selecting territorial mapping units for modelling the ecological situation of a large city. Using Hanoi as a case study, it is shown that the use of a single type of spatial unit does not make it possible to simultaneously account for the natural patterns of pollutant migration, the characteristics of spatially continuous environmental factors, and the requirements of public administration. A multilevel system of operational territorial units (OTUs) is proposed, including a regular grid, river basins, and administrativelegal units. Particular attention is paid to justifying the choice of the firstlevel gridbased OTU for mapping spatially continuous factors of the urban environment. The selection of the grid shape and size is proposed to be based on six criteria: the properties of the mapped phenomenon, the quality of the input data, the characteristics of the models and algorithms used, the mapping scale, urban morphology, and the sensitivity of the results

to the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP). A regular hexagonal grid with an area of approximately 25 hectares is proposed as the basic gridbased OTU at the urban level.

Keywords: environmental mapping, OTU, Web GIS, Hanoi, hexagonal grid, river basin, administrative boundaries, MAUP

Введение

В современных географических и экологических исследованиях выбор территориальной единицы картографирования является одним из ключевых методических вопросов. От того, каким образом территория делится на пространственные единицы, зависит не только внешний вид карты, но и достоверность пространственного анализа, корректность интерполяции, возможность сопоставления разнородных данных и практическая применимость результатов для экологического управления.

Особенно остро данная проблема проявляется при моделировании экологической обстановки крупного города. Городская среда характеризуется высокой плотностью населения, сложной структурой источников загрязнения, неоднородной застройкой, интенсивной транспортной нагрузкой, фрагментарностью зеленых насаждений и существенной трансформацией природных ландшафтов. В этих условиях невозможно ограничиться только административными границами, поскольку атмосферные выбросы, шум, тепловое поле и водный сток не подчиняются административному делению. Вместе с тем полностью отказаться от административных единиц также нельзя, поскольку именно они являются основой статистического учета, природоохранного контроля и принятия управленческих решений.

Методы и материалы

В теории геоэкологического картографирования операционная территориальная единица (ОТЕ) рассматривается как базовая пространственная единица, используемая для сбора, анализа, интерполяции, агрегирования и визуализации экологических данных. Некорректный выбор такой единицы может привести к искажению пространственной картины загрязнения, завышению или занижению экологических оценок и ошибочным управленческим выводам [1].

Одной из наиболее известных проблем, связанных с выбором территориальных единиц, является проблема модифицируемой площадной единицы (Modifiable Areal Unit Problem/MAUP). Она проявляется в том, что результаты анализа могут существенно изменяться в зависимости от формы, размера и способа группировки пространственных единиц. Например, один и тот же набор точечных наблюдений за качеством воздуха может дать различные пространственные оценки при агрегировании по административным районам, регулярной сетке или природным бассейнам.

В существующих исследованиях единицы картографирования целесообразно разделять на две группы. Первая группа – минимальные единицы оценки, используемые для непосредственного расчета или моделирования экологических показателей. Вторая группа – агрегированные аналитические единицы, необходимые для обобщения результатов, интерпретации и практического применения в системе

управления [2]. В настоящее время выделяют три основных подхода к формированию таких пространственных единиц:

Сеточный подход: наиболее распространенный в современных ГИС-технологиях, основан на использовании регулярных квадратных матриц, равномерно покрывающих исследуемую территорию. Преимущество данного подхода заключается в упрощении математических вычислений, что позволяет оперативно интегрировать множество различных растровых слоев данных. Однако с позиции ландшафтно-экологического анализа такие ячейки лишены содержательного смысла, так как они фрагментируют биотопы, не отражают реальных природных границ и не позволяют учесть целостность экосистем или направленность потоков вещества [3].

Ландшафтный подход: базируется на таксономических единицах физической географии (ландшафт, урочище, фация). Данный метод эффективен при оценке устойчивости экосистем к внешнему воздействию, поскольку каждая ландшафтная единица обладает специфической экологической емкостью [1]. Тем не менее, в условиях высокоурбанизированной среды, такой как Ханой, естественная поверхность подверглась глубокой трансформации вследствие сплошной застройки и «запечатывания» почв. Это делает выделение границ ландшафтов субъективным процессом, в рамках которого сложно достичь научной обоснованности.

Бассейновый подход: рассматривается как наиболее оптимальная и системная методологическая основа в современной геоэкологии, особенно для территорий с развитой гидрографической сетью. Речной бассейн представляет собой не просто топографическую границу, а целостную природную геосистему, объединенную направленным потоком вещества и энергии от водоразделов к эрозионным понижениям [4]. Любое антропогенное воздействие на территорию бассейна от бытовых отходов и сельскохозяйственных химикатов до городских сточных вод аккумулируется и наиболее выражено проявляется в качественных показателях вод в замыкающем створе.

Результаты

Однако экологические процессы имеют иную пространственную природу. Загрязнение атмосферного воздуха распространяется в зависимости от структуры источников выбросов, метеорологических условий и городской морфологии. Загрязнение водной среды подчиняется логике водосборных бассейнов, рельефа и направленного стока. Тепловое загрязнение и шум формируют поля, которые не совпадают с административными рубежами. Поэтому возникает методическое противоречие: данные управления организованы по административным единицам, тогда как природные процессы развиваются по физикогеографическим закономерностям. Для преодоления данного противоречия предлагается использовать гибридную многоуровневую систему территориальных единиц картографирования, включающую три взаимосвязанных уровня ОТЕ.

Первый уровень – регулярная сеточная ОТЕ. Он предназначен для картографирования пространственно непрерывных биофизических факторов городской

среды: качества атмосферного воздуха, шума, теплового режима и других параметров, изменяющихся без строгой привязки к административным границам. На этом уровне территория города делится на регулярные ячейки, которые выступают минимальными единицами оценки. Выбор сетки не может быть произвольным и должен учитывать не только техническую удобность, но и экологическую природу картографируемых явлений. В настоящем исследовании предлагается использовать шесть критериев выбора формы и размера сеточной ОТЕ.

1. Первый критерий – физико-химические и пространственные свойства картографируемого явления. Разные экологические факторы обладают неодинаковой пространственной изменчивостью. Транспортнозависимые загрязнители и шум характеризуются резкими локальными градиентами, тогда как $PM_{2.5}$ и PM_{10} формируют более сглаженное, но всё же неоднородное поле концентраций. Это означает, что один и тот же размер сетки не может быть одинаково оптимален для всех видов загрязнения и всех масштабов анализа.

2. Второй критерий – пространственное разрешение и качество исходных данных. Размер ячейки должен соответствовать фактической информативности спутниковых, метеорологических, картографических и наземных данных. Чрезмерно мелкая сетка может создавать эффект ложной точности, когда карта выглядит более детальной, чем это допускается исходной информационной базой.

3. Третий критерий – особенности применяемых моделей и алгоритмов. Сеточная ОТЕ должна быть пригодна для пространственной интерполяции, даунскейлинга, расчета предикторов, растровой алгебры и сопоставления результатов моделирования. Она должна быть достаточно детальной для выявления внутригородских различий, но одновременно достаточно устойчивой для статистически надежного расчета показателей.

4. Четвертый критерий – масштаб и цель картографирования. Если задача состоит в микромасштабном моделировании отдельной улицы, транспортного узла или промышленного источника, требуется одна степень детализации. Если же цель заключается в экологическом веб-картографировании всей городской территории, необходима более обобщенная и устойчивая единица. В рамках настоящей работы акцент делается именно на городском уровне.

5. Пятый критерий – городская морфология и структура источников загрязнения. Ханой характеризуется сочетанием плотной жилой застройки, крупных магистралей, промышленных зон, ремесленных поселений, водоемов, парков и зеленых насаждений. Выбранная сетка должна позволять отразить контрасты между этими типами городского пространства.

6. Шестой критерий – чувствительность результатов к MAUP. Форма и размер ячейки должны минимизировать искажения, возникающие при искусственном делении непрерывного пространства на дискретные территориальные единицы. В этом отношении важны не только площадь ячейки, но и ее геометрия, структура соседства и устойчивость результатов при последующей агрегации.

Указанные критерии показывают, что не существует единого размера сетки, одинаково оптимального для всех видов загрязнения воздуха. Однако для экологической Веб-ГИС городского уровня необходимо определить стандартную сеточную

ОТЕ, позволяющую интегрировать и сопоставлять различные экологические показатели в единой пространственной системе. В качестве основной сеточной ОТЕ первого уровня предлагается регулярная шестиугольная сетка площадью около 25 га (рис. 1). Такой размер ячейки рассматривается как методический компромисс. С одной стороны, ячейка площадью около 25 га достаточно детальна для выявления внутригородских контрастов экологической обстановки, например различий между зонами интенсивной транспортной нагрузки, промышленной застройки, плотной жилой застройки. С другой стороны, такая ячейка достаточно обобщена, чтобы снизить влияние локальных пробелов наблюдений и не создавать чрезмерной детализации, не обеспеченной исходными данными.

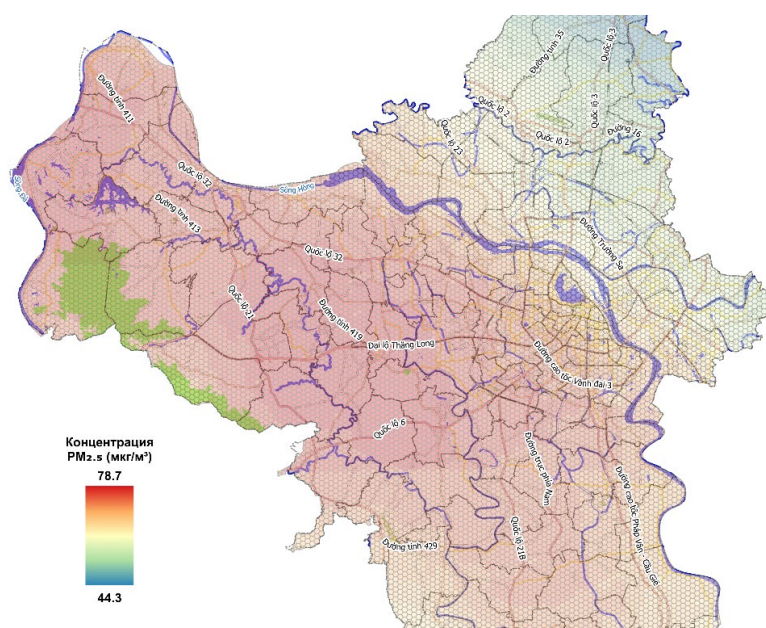


Рис. 1. Карта распределения среднесуточной концентрации $PM_{2.5}$ в апреле 2023 г. на шестиугольной сетке площадью 25 га

Выбор шестиугольной формы обусловлен рядом преимуществ по сравнению с квадратной сеткой. Шестиугольная ячейка имеет более равномерную структуру соседства: каждая ячейка имеет шесть соседей, расположенных более равноправно по отношению к центру. В квадратной сетке возникает неоднозначность между ортогональными и диагональными соседями, что может влиять на анализ пространственной связности, кластеров и направлений распространения процессов. Шестиугольная сетка также обладает меньшей направленной анизотропией и визуально лучше передает пространственные паттерны без избыточной ориентации по вертикальным и горизонтальным осям.

Второй уровень – природно-географические единицы, прежде всего речные бассейны и подбассейны. Этот уровень необходим для оценки состояния водной среды, ассимиляционного потенциала водных объектов, накопления загрязняющих веществ и анализа антропогенной нагрузки в пределах водосборов. Для водной среды административные границы или регулярные сетки менее репрезентативны, чем бас-

сейновые единицы, поскольку перенос загрязняющих веществ подчиняется рельефу и направлению стока [4]. Применительно к Ханюю в качестве ОТЕ второго уровня целесообразно использовать границы подбассейнов рек Толик, Ньюэ и Даи (рис. 2). Эти единицы позволяют рассчитывать суммарную антропогенную нагрузку, учитывать источники сброса, оценивать ассимиляционный потенциал поверхностных вод и анализировать качество донных отложений.

Бассейновый уровень не заменяет сеточный, а дополняет его. Если сетка используется для непрерывных факторов городской среды, то бассейны применяются там, где пространственная организация процесса определяется направленным водным стоком.

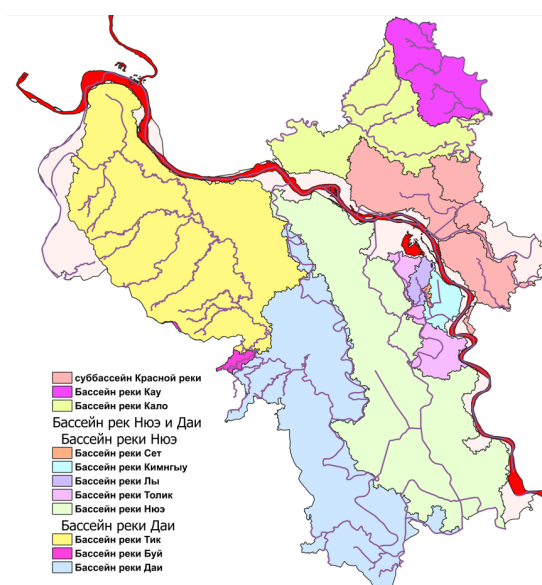


Рис. 2. Речные бассейны в Ханое

Третий уровень – агрегированные административные и правовые единицы. Несмотря на то, что пространственные сетки и речные бассейны оптимальны для проведения экологического анализа, они зачастую не учитываются в процессах государственного администрирования [5]. В связи с этим административные единицы (уровня общин, кварталов) должны быть в обязательном порядке определены в качестве агрегированных ОТЕ. Этот уровень обеспечивает связь результатов экологического анализа с системой государственного управления, статистического учета, экологического нормирования и принятия решений. Кроме административных границ, важную роль играют зоны экологического регулирования (рис. 3).

Согласно законодательству Вьетнама, экологическое зонирование включает зоны строгой охраны, зоны ограничения выбросов и иные зоны. Зоны строгой охраны охватывают наиболее чувствительные территории, включая центральные городские районы, источники поверхностных вод хозяйственнопитьевого назначения, природные заповедники, охраняемые зоны объектов историкокультурного наследия и ядра природного наследия. Зоны ограничения выбросов включают буферные зоны

территорий строгой охраны, важные водно-болотные угодья, охранные коридоры источников водоснабжения и другие чувствительные территории [9]. Цифровое представление таких границ в экологической Веб-ГИС позволяет автоматически сопоставлять измеренные или смоделированные показатели загрязнения с нормативными требованиями, а также формировать предупреждения для органов управления.

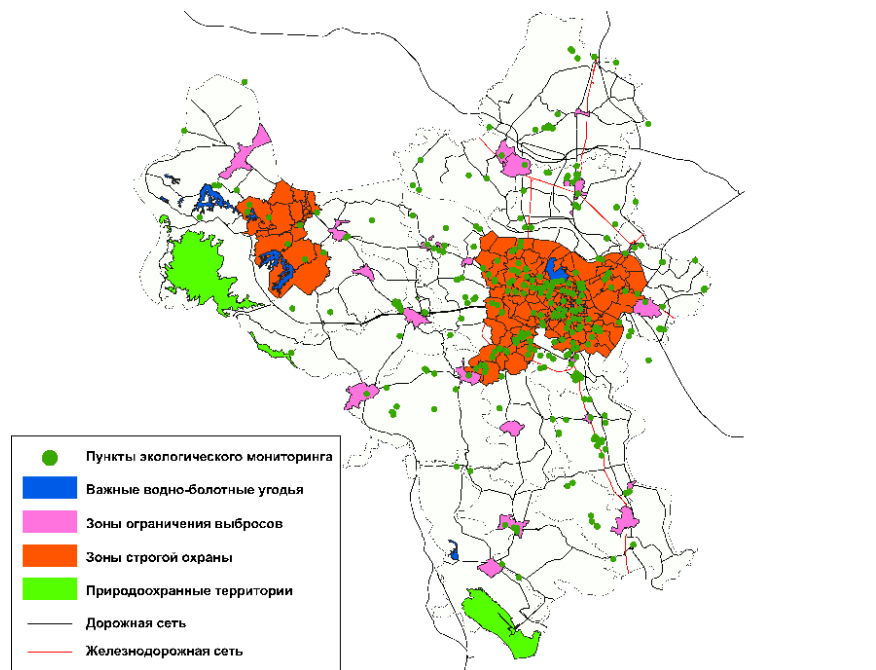


Рис. 3. Карта современного состояния экологического зонирования столицы Ханоя за 2023 год

Заключение

Выбор территориальной единицы картографирования является ключевым методическим условием достоверного моделирования экологической обстановки города. На примере Ханоя показано, что ни один тип пространственных единиц не способен самостоятельно решить все задачи экологического картографирования. Регулярная сетка удобна для моделирования пространственно непрерывных факторов, речные бассейны необходимы для анализа водной среды, а административные и правовые единицы обеспечивают практическую связь результатов с системой управления.

Предложенная многоуровневая система ОТЕ позволяет совместить научную корректность экологического анализа с требованиями государственного администрирования. Первый уровень – шестиугольная сетка площадью около 25 га – используется как стандартная сеточная ОТЕ городского уровня. Второй уровень – речные бассейны и подбассейны – обеспечивает учет природной логики водной среды. Третий уровень – административные границы и зоны экологического регулирования – обеспечивает связь с правовыми и управленческими механизмами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стурман В. И. Экологическое картографирование: учебное пособие. – М.: Аспект Пресс, 2003. – 258 с.
2. Shen J., Chen C., Wang Y. What are the appropriate mapping units for ecosystem service assessments? A systematic review // *Ecosystem Health and Sustainability*. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – Article 1888655.
3. Cleland D. T., Avers P. E., McNab W. H., Jensen M. E., Bailey R. G., King T., Russell W. E. National Hierarchical Framework of Ecological Units // *Ecosystem Management Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources*. – New Haven: Yale University Press, 1997. – P. 181–200.
4. Yermolaev O. P., Usmanov B. M., Muharamova S. S. The Basin Approach and Mapping to the Anthropogenic Impact Assessment on the East of the Russian Plain // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10. – № 20. – P. 41178–41184.
5. Stenis J., Romanov M., Hogland W. Analysis and Classification of Modern Methods of Ecological Normalization // *The Open Environmental Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 4. – P. 181–189.
6. Birch C. P. D., Oom S. P., Beecham J. A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology // *Ecological Modelling*. – 2007. – Vol. 206. – № 3–4. – P. 347–359.
7. Mukharamova S., Ivanov M., Yermolaev O. Assessment of Anthropogenic Pressure on the Volga Federal District Territory Using River Basin Approach // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. – № 4. – Article 139.
8. Национальное собрание СРВ. Закон об охране окружающей среды № 72/2020/QN14. – Ханой, 17 ноября 2020 г.
9. Правительство СРВ. Постановление № 08/2022/NĐ-CP «О детальном регулировании отдельных положений Закона об охране окружающей среды». – Ханой, 10 января 2022 г.
10. Правительство СРВ. Постановление № 307/2025/NĐ-CP «О классификации административных единиц». – Ханой, 27 ноября 2025 г.
11. Министерство природных ресурсов и экологии СРВ. Циркуляр № 01/2025/ТТ-BNNMT «Об утверждении трех национальных технических регламентов качества окружающей среды». – Ханой, 15 мая 2025 г.
12. Министерство природных ресурсов и экологии СРВ. Циркуляр № 06/2025/ТТ-BTNMT «Об утверждении Национального технического регламента по промышленным сточным водам». – Ханой, 28 февраля 2025 г.

© Д. К. Нгуен, О. Н. Николаева, 2026