

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-42-44

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИ-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ КАК ЭТАП ВЫЯВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ

IDENTIFICATION OF HYDROLOGICALLY SENSITIVE LANDSCAPES AS A STAGE FOR IDENTIFYING ORGANIZATION OF GEOSYSTEMS

Семенов Ю.М.¹, Семенов М.Ю.², Силаев А.В.³Semenov Yu.M.¹, Semenov M.Yu.², Silaev A.V.³

e-mail: yumsemenov@mail.ru

¹Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия,²Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия¹V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia²Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia³V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Разработана методика выявления аккумулятивных ландшафтов, являющихся вторичными источниками загрязнения поверхностных вод в бассейне реки Селенги. Для установления возможностей и поиска конкретных местоположений их формирования рассчитан топографический индекс влажности TWI. Участки территории с диапазонами показателей TWI 12–15 и 15–18 были идентифицированы как площади с наиболее вероятными зонами стока. Для оценки возможности их влияния на формирование состава речного стока создана карта суммарного стока с использованием модели Flow Accumulation. Выявление гидрологически-чувствительных участков водосбора (HSA) производилось путем наложения карты пространственного распределения участков с максимальными значениями суммарного стока на карту дифференциации величин TWI. В качестве истинных гидрологически-чувствительных ландшафтов были идентифицированы те их участки, контуры которых располагаются в пределах территорий с максимальными значениями величин суммарного стока. Проведены исследования на модельной территории г. Улан-Удэ, являющегося одним из основных загрязнителей вод р. Селенги и оз. Байкал. Основным условием формирования вторичных источников загрязнения (аккумулятивных ландшафтов) является совпадение зоны действия источника загрязнения с HSA. Составленная карта производственных объектов была наложена на карту пространственного распределения HSA, фрагменты которых в границах промзон были идентифицированы как возможные вторичные источники загрязнения (критические территории-источники – CSA).

Abstract. Methodology has been developed for identifying accumulative landscapes that are secondary sources of surface water pollution in the Selenga River basin. To establish the possibilities and search for specific locations of their formation, the topographic index of humidity TWI is calculated. Areas with TWI ranges of 12–15 and 15–18 were identified as areas with the most likely runoff zones. To assess the possibility of their influence on the formation of the composition of the river flow, a map of the total flow was created using the Flow Accumulation model. Hydrological-sensitive watershed areas (HSAs) were identified by superimposing a spatial distribution map of areas with maximum total runoff values on the TWI differentiation map. As true hydrological-sensitive landscapes, those areas of which contours are located within territories with maximum values of total runoff were identified. Studies were carried out on the model territory of the city of Ulan-Ude, which is one of the main pollutants in the waters of the Selenga River and Lake Baikal. The main condition for the formation of secondary pollution sources (accumulative landscapes) is the coincidence of the area of action of the pollution source with HSA. The compiled map of production facilities was superimposed on the map of the spatial distribution of HSA, fragments of which within the boundaries of industrial zones were identified as possible secondary sources of pollution (critical source territories - CSA).

Ключевые слова: Селенга, бассейн, топографический индекс влажности, суммарный сток, гидрологически-чувствительные ландшафты, вторичные источники загрязнения.

Keywords: Selenga, basin, topographic humidity index, total runoff, hydrological-sensitive landscapes, secondary sources of pollution.

Организация геосистем, то есть их внутренняя упорядоченность и взаимосвязанное функционирование морфологических частей и компонентов, так или иначе отражается в дифференциации их вещественной составляющей, приводя к определенной последовательности изменения вещества геосистем и новым пространственным сочетаниям его показателей. Геосистемы различаются по уровню пространственной организации и регулирования качества поверхностных вод в зависимости от характера сопряжения автономных и транзитных ландшафтов с аккумулятивными, обладающими разной способностью к депонированию загрязнителей. Поэтому загрязнение вод можно рассматривать как функцию (отражение) организации ландшафта в большей степени, нежели интенсивности антропогенного воздействия. Существование оптимальных взаимоотношений природы и общества возможно только при создании между ними соответствующих интеграционных процессов в рамках «сотворчества» [1]. В настоящей работе предпринята попытка разработать методический аппарат обеспечения одного из путей такой интеграции путем выявления гидрологически-чувствительных ландшафтов с целью снижения риска попадания аккумулятированного в них вещества в водные объекты. При исследовании происхождения загрязняющих веществ в водах в качестве их источников обычно рассматриваются газопылевые выбросы заводов, неочищенные стоки коммунальных предприятий, валяющийся на берегу мусор и т.д. Однако фактически непосредственными источниками загрязнения вод являются неприметные понижения рельефа, пологие части склонов или заболоченные участки поймы, куда в течение зимы или засушливого лета ветром или водой сносятся загрязнители. Накопленные в таких аккумулятивных ландшафтах загрязняющие вещества с поверхностным и грунтовым стоком попадают в близлежащие реки и ручьи. Предотвращение или прекращение поступления загрязнителей в водные объекты невозможно без выявления ланд-

шафтов, из которых происходит загрязненный сток.

В России подобные работы не проводились, а главным отличием нашего подхода от подходов от зарубежных является оценка способности аккумулятивных ландшафтов депонировать загрязняющие вещества. Предполагается классифицировать геосистемы по уровню их пространственной организации и регулирования качества поверхностных вод, выявить первичные источники загрязняющих веществ, депонированных в аккумулятивных ландшафтах, и выявить пути их миграции (потоки) до аккумулятивных ландшафтов. Первичными источниками загрязнения вод являются различные промышленные, коммунально-бытовые объекты и сельскохозяйственные угодья. Прежде чем попасть в водный объект, загрязнители проходят некоторый путь, на котором они неоднократно рассеиваются и концентрируются, а в периоды с большим количеством осадков трансэлювиально-аккумулятивные, аккумулятивные и трансаккумулятивные ландшафты становятся вторичными источниками воды, растворенного и взвешенного вещества. Поэтому, обнаружив места временной аккумуляции поллютантов на пути от источников к водным объектам и оценив закономерности их пространственного распределения, можно не только воспрепятствовать попаданию накопленных там примесей в водный объект, но и выявить их первичные источники.

В настоящее время исследований роли аккумулятивных ландшафтов в депонировании загрязнителей и загрязнении поверхностных вод проводится явно недостаточно, хотя теоретические основы и предпосылки для познания в российском естествознании имеются. С точки зрения геохимии ландшафтов они служат механическими геохимическими барьерами, накапливающими вещество, поступающее из атмосферных выпадений или с поверхностным и грунтовым стоками [2, 3], а с точки зрения гидрологии суши – участками формирования стока [4, 5]. В зарубежной литературе [6, 7] такие объекты называют гидрологически-чувствительными территориями (hydrologically sensitive areas – HSA). При наличии на HSA отходов промышленных, коммунальных или аграрных объектов они могут стать источниками загрязнения поверхностных вод [8, 9] – критическими территориями-источниками (critical source areas – CSA). В отечественных источниках присутствует понятие «гидрологическая чувствительность ландшафта» [14, 15], «пришедшее» из ландшафтного планирования [16], где его используют при оценке современного состояния территории как меру способности ландшафта реагировать на изменение гидрологической ситуации.

Отработка и уточнение разрабатываемой методики исследования роли аккумулятивных ландшафтов в депонировании загрязнителей проводились в ходе исследований геосистем бассейна реки Селенги – главного притока озера Байкал. План реализации проекта включал создание цифровой модели рельефа (ЦМР) территории, выявление с ее помощью гидрологически-чувствительных ландшафтов, а также установление территорий, являющихся источниками загрязнения поверхностных вод, путем проверки уровней содержания загрязнителей в почвах и водах HSA [17]. В ходе реализации проекта использовались методы геоинформационного моделирования и выявления источников загрязнения путем виртуального разделения смеси загрязнителей на компоненты [18, 19]. Для выявления участков накопления стока (FA) и расчета TWI за основу были взяты находящиеся в свободном доступе данные глобальной цифровой модели поверхности (DSM) ALOS World 3D - 30m (AW3D30) [20]. Цифровая модель рельефа была переведена в проекцию WGS84 UTM Zone 48N [21] после предварительной обработки инструментами Simple Filter и Fill Sinks [22] в программе SAGA GIS с целью фильтрации некорректных значений высот. Далее с использованием откорректированной модели рельефа были рассчитаны значения TWI [23, 24].

Полученное растровое непрерывное индексированное изображение было преобразовано в векторный слой, пригодный для обработки и анализа. В целях повышения информативности карта была генерализована, а векторное изображение пространственного распределения величин TWI трансформировано в линейное и сглажено с использованием инструмента Smooth в программе QGIS. Карта TWI отражает влажность почв исследуемой территории и способность почвы к формированию поверхностного стока, т.е. в первом приближении ее можно считать картой гидрологически-чувствительных участков водосбора (HSA). Так как некоторые участки территории, характеризующиеся высокими величинами TWI, могли оказаться бессточными понижениями, для проверки наличия стока воды с этих участков в реки и выделения участков наибольшего накопления стока на основе ЦМР с использованием модели Flow Accumulation [25] была создана карта суммарного стока (FA). Наибольшие величины TWI соответствовали руслам рек и временных водотоков, наименьшие – верхним частям склонов и поверхностям водоразделов. Так как русла и водоразделы в формировании поверхностного стока не участвуют, требовалось определить диапазоны величин TWI, характерные для HSA как тех участков бассейна, где в результате выпадения атмосферных осадков при насыщении почвы водой до полной влагоемкости формируется сток, главным образом, поверхностный. Это возможно в двух случаях: 1) количество осадков превышает величину влагоемкости почвы, причина низкой влагоемкости – малая мощность профиля почв верхних частей склонов ($TWI = 12-15$); 2) почва уже насыщена влагой, и ее остаточная емкость по отношению к воде невелика – в долинах рек, где зеркало грунтовых вод близко к поверхности ($TWI = 15-18$).

В результате проведенных полевых работ отобраны модельные полигоны для отработки методики картирования гидрологически-чувствительных участков и первичных источников загрязнения. Основные исследования проводились на модельной территории г. Улан-Удэ, являющегося одним из основных загрязнителей вод р. Селенги и оз. Байкал. Выявление HSA производилось путем взаимного наложения карт пространственного распределения величин TWI и участков максимального FA. В качестве истинных HSA были идентифицированы те участки предварительно установленных HSA, кон-

туры которых располагаются в пределах участков поверхности с максимальным FA , то есть находятся на пути наиболее интенсивных временных водных потоков. Правильность идентификации HSA , проведенная в ходе выполнения дальнейших полевых работ, была подтверждена во всех случаях.

Так как условием формирования критических территорий-источников (CSA) является совпадение зоны действия источника загрязнения с HSA , составленная для выделения CSA карта производственных объектов (РПО) была наложена на карту пространственного распределения HSA , и фрагменты HSA в границах РПО были идентифицированы как CSA . Корректность выделения CSA подтверждена результатами оценки уровня загрязнения почв г. Улан-Удэ. Установлено, что благодаря разным режимам работы и разной мощности предприятий уровни загрязнения почв разных CSA сильно различались. Тем не менее, средний уровень загрязнения почв всех CSA был примерно в 2-3 раза выше среднего уровня загрязнения почв за пределами CSA и в 5-10 раз выше уровня загрязнения почв за пределами Улан-Удэ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-27-00132).

Литература

1. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 319 с.
2. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
3. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 331 с.
4. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 322 с.
5. Федоров В.Н. Ландшафтная индикация речного стока. – Иркутск; М: Изд-во ИГ СО РАН, 2007. – 175 с.
6. Agnew L.J., Lyon S., Gérard-Marchant P. et al. (2006) Identifying hydrologically sensitive areas: bridging science and application // *Journal of Environmental Management* 78:64-76.
7. Walter M. T., Walter M. F., Brooks E. S. et al. (2000) Hydrologically sensitive areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment // *Journal of Soil and Water Conservation* 55(3):277-284.
8. Heathwaite L., Quinn P. F., Hewett C. (2005) Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation // *Journal of Hydrology* 304(1-4):446-461.
9. Reaney S. M., Mackay E. B., Haygarth P. M. et al. (2019) Identifying critical source areas using multiple methods for effective diffuse pollution mitigation // *Journal of Environmental Management*. V. 250. 109366
10. Dickinson W. T., Rudra R. P., Wall G. J. (1990) Targeting remedial measures to control non-point source pollution // *American water research bulletin*. V. 26(3). P. 499-507.
11. Maas R. P., Smolen M. D., Dressing S. A. (1985) Selecting critical areas for nonpoint source pollution control // *Journal of soil and water conservation*. V. 40(1). P. 68-71.
12. Pionke H. B., Gburek W. J., Sharpley A. N. (2000) Critical source area controls on water quality in an agricultural watershed located in the Chesapeake Basin // *Ecological engineering*. V. 14. P. 325-335.
13. Qiu Z. Assessing critical source areas in watersheds for conservation buffer planning and riparian restoration // *Environmental Management*. – 2009. – V. 44. – P. 968-980.
14. Антипов А. Н., Федоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 254 с.
15. Гагаринова О. В., Ковальчук О. А. Гидрологические факторы в ландшафтном планировании бассейна озера Байкал // *География и природные ресурсы*. – 2012. – № 4. – С. 58-64.
16. Landscape Planning: Tools and Experience in Implementation / Antipov A. N., Kravchenko V. V., Semenov Yu. M. et al. – Bonn; Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2006. – 149 p.
17. Semenov M. Y., Silaev A. V., Semenov Yu. M. et al. Identifying and characterizing critical source areas of organic and inorganic pollutants in urban agglomeration in Lake Baikal watershed. *Sustainability*, 2022, 14, 14827. –
18. Семенов М. Ю., Снытко В. А. Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // *Доклады Академии наук*. – 2013. – № 453 (6). – С. 686-689.
19. Christophersen N., Neal C., Hooper R. P. et al. (1990) Modelling streamwater chemistry as a mixture of soil water end-members – a step towards second-generation acidification models // *Journal of Hydrology*. V. 116. P. 307-320.
20. ALOS Global Digital Surface Model ALOS World 3D – 30 m (AW3D30). Dataset. Product Format Description. Version 1.1. – URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
21. Planchon O., Darboux F. (2002) A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena*. 46 (2-3). P. 159-176.
22. Conrad O., Bechtel B., Bock M. et al. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v.2.1.4. *Geoscience Model Development*, 8. – URL: <https://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/>
23. Beven K. J., Kirkby M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrological Science Bulletin*. 24 (1): 43–69.
24. Gallant J. C., Hutchinson M. F. (2011) A Differential Equation for Specific Catchment Area // *Water Resources Research*. – 2011. – V. 47, No 5. – P. 28-33.
25. How to compute flow direction and flow accumulation with QGIS? – URL: <https://gis.stackexchange.com/questions/68158/how-to-compute-flow-direction-and-flow-accumulation-with-qgis>