

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ ПОРТА С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ

В. А. МИКЛУШ, Т. М. ТАТАРНИКОВА, И. И. ПАЛКИН

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: miklush-v@yandex.ru*

Представлено решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков различной физической природы с централизованным управлением. Эффективное расположение датчиков в зоне проводимого мониторинга должно удовлетворять условию полного покрытия зоны ответственности мониторинга зонами чувствительности датчиков и заданной точности определения местоположения объекта наблюдения. Предложен алгоритм определения зоны покрытия датчиками зоны ответственности мониторинга. Приведены математические выражения для определения плотности сети мониторинга.

Ключевые слова: экологический мониторинг, акватория порта, датчики, геометрия расположения, зона ответственности датчика, критерий максимума информации

Введение. Системы дистанционного экологического мониторинга акватории порта создаются в целях своевременного предупреждения чрезвычайных ситуаций, например выбросов (разливов) нефти на водную поверхность, обледенения и наличия в акватории посторонних объектов [1—3].

Одним их технических решений при реализации дистанционного экологического мониторинга является распределенная сеть измерительных устройств (датчиков) — многосенсорная сеть, передающая информацию о состоянии объекта мониторинга в пункт наблюдения и контроля, на основании которой принимаются решения для ликвидации последствий экологических катастроф и их предупреждения в будущем [4].

Поскольку в структуре системы экологического мониторинга могут быть датчики различной физической природы, то возникает задача их эффективного расположения с учетом различных целевых функций и метрик, таких как детерминистическое или стохастическое расположение датчиков, наличие датчиков с одинаковой и разной зонами чувствительности, наложение дополнительных условий, определяющих энергетическую эффективность, минимально необходимое количество сенсоров в зоне мониторинга и организацию сетевого трафика [5, 6].

Задачу эффективного расположения датчиков в зоне проводимого мониторинга (ответственности) сформулируем следующим образом: найти схему эффективного расположения датчиков с точки зрения полного покрытия зоны ответственности мониторинга зонами чувствительности датчиков, т.е. такую схему, при которой каждая точка в зоне ответственности находится в зоне чувствительности хотя бы одного датчика.

Постановка задачи иллюстрируется рис. 1: в системе мониторинга имеется n датчиков, которые могут быть различны по форме и чувствительности, и присутствуют участки зоны ответственности (прямоугольник), не попавшие в зону чувствительности (круги) ни одного датчика [7].

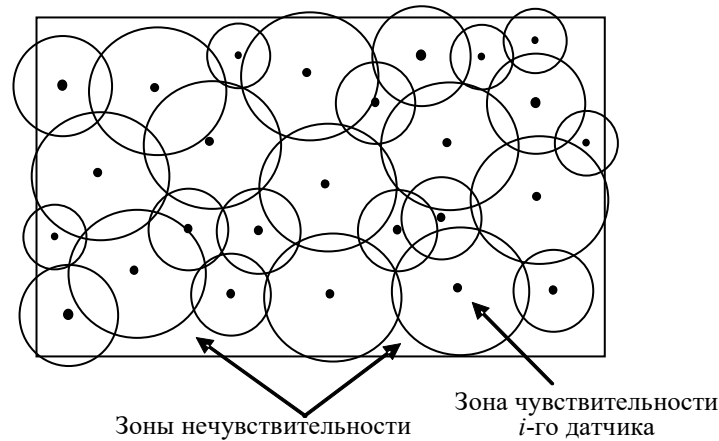


Рис. 1

Необходимо иметь в виду, что полное покрытие зоны ответственности мониторинга зонами чувствительности датчиков гарантирует обнаружение объекта, но не означает определение его местоположения с достаточной точностью. Для точного определения местоположения объекта мониторинга структура многосенсорной системы должна содержать большее количество датчиков, поэтому при их размещении следует учитывать возможные ошибки такого определения.

Определение зоны покрытия датчиками зоны ответственности мониторинга. Рассмотрим первый случай, при котором все датчики характеризуются одинаковой зоной чувствительности. Зона чувствительности каждого i -го датчика, расположенного в зоне ответственности с координатами (x_i, y_i) , представляет собой круг радиусом $r_i=1$. Если сеть мониторинга состоит из k одинаковых датчиков, то $r_1=r_2=\dots=r_k=1$. Таким образом, любая точка поверхности, принадлежащая периметру зоны чувствительности датчика s_i не находится в зоне чувствительности датчика s_j , если расстояние между сенсорами s_i и s_j равно

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 2r. \quad (1)$$

На рис. 2 показана схема определения сегмента периметра зоны чувствительности датчика s_i , находящегося в зоне чувствительности датчика s_j , — дуга периметра зоны чувствительности датчика s_i , опирающаяся на угол $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$, попадает в зону чувствительности датчика s_j .

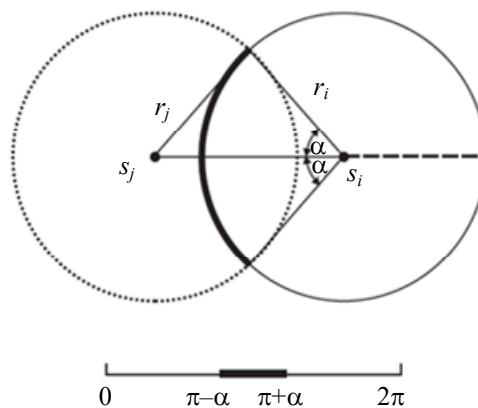


Рис. 2

Рассмотрим алгоритм перекрытия зон чувствительности k одинаковых датчиков, расположенных, как показано на рис. 3.

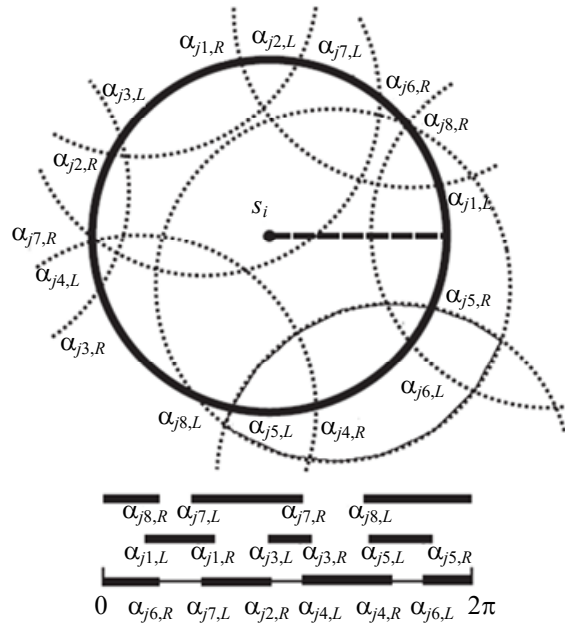


Рис. 3

1. Для каждого датчика s_j , такого что $d(s_i, s_j) < 2r$, определяем угол дуги $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$ периметра датчика s_i , который находится в зоне чувствительности датчика s_j ; $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$ — это точки пересечения зоны чувствительности датчика s_j с зоной чувствительности датчика s_i (жирная линия); например, датчик s_{j3} имеет 2 точки пересечения с периметром датчика s_i — $\alpha_{j,L}$ и $\alpha_{j,R}$, образующие дугу.

2. Для всех датчиков s_j , таких что $d(s_i, s_j) < 2r$, находящихся по соседству с датчиком s_i , помещаем точки $\alpha_{j,L}$ и $\alpha_{j,R}$ на линию $0—2\pi$, представляющую собой „развернутую“ окружность, и соединяем эти точки отрезком прямой. Линии $[0, 2\pi]$ располагаем одна под другой соответственно нисходящему порядку датчиков, так что линии, соответствующие большим порядковым номерам датчиков, находятся сверху, а линии, соответствующие меньшим порядковым номерам, — под ними.

3. Периметр зоны чувствительности сенсора s_i полностью перекрывается зонами чувствительности соседних датчиков, если отрезки $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$ всех датчиков могут составить непрерывную линию $[0, 2\pi]$.

Рассмотрим другой случай, при котором датчики характеризуются различной зоной чувствительности. Зоны чувствительности датчиков по-прежнему имеют форму круга, но $r_1 \neq r_2 \neq \dots \neq r_n \neq 1$. Рассмотрим два варианта расположения датчиков с тремя возможными соотношениями между радиусами зоны чувствительности датчиков и расстояниями между ними.

Вариант 1 показан на рис. 4, а, для него справедливы следующие правила:

- 1) если $r_j < d(s_i, s_j)$, то датчик s_j лежит вне зоны чувствительности датчика s_i ;
- 2) если $d(s_i, s_j) - r_i \leq r_j \leq d(s_i, s_j) + r_i$, то дуга периметра зоны чувствительности датчика s_i , опирающаяся на угол $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$, попадает на периметр зоны чувствительности датчика s_j , а угол α определяется по формуле

$$r_j^2 = r_i^2 + d(s_i, s_j)^2 - 2r_i d(s_i, s_j) \cos \alpha; \tag{2}$$

3) если $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$, то весь периметр $[0, 2\pi]$ зоны чувствительности датчика s_i входит в зону чувствительности датчика s_j .

Вариант 2 показан на рис. 4, б, для него справедливы следующие правила:

1) если $r_j < r_i - d(s_i, s_j)$, то периметр зоны чувствительности датчика s_i лежит вне зоны чувствительности датчика s_j ;

2) если $r_j - d(s_i, s_j) \leq r_j \leq d(s_i, s_j) + r_i$, дуга периметра зоны чувствительности датчика s_j , опирающаяся на угол $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$, попадает на периметр зоны чувствительности датчика s_j , а угол α определяется выражением (2).

3) если $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$, то весь периметр $[0, 2\pi]$ зоны чувствительности датчика s_i входит в зону чувствительности датчика s_j .

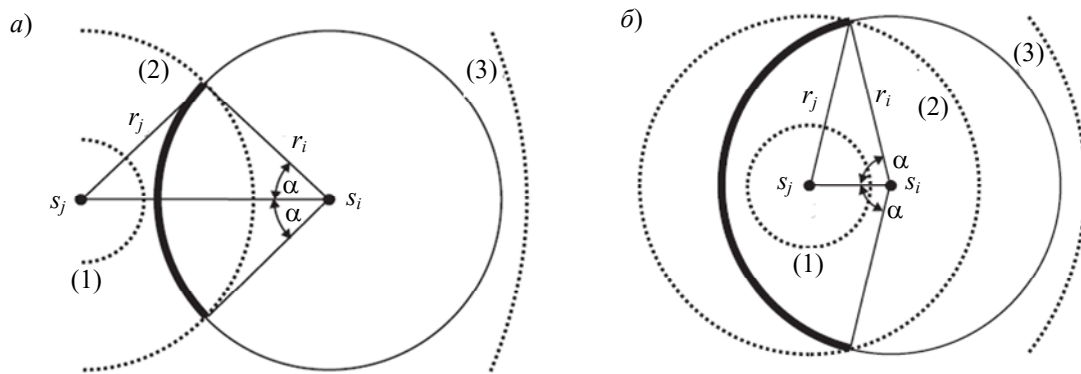


Рис. 4

Для определения участков зоны ответственности мониторинга, не попавших в зону чувствительности датчиков, пункт наблюдения и контроля посылает всем датчикам широковещательное сообщение о требуемом количестве датчиков n , покрывающих периметр зоны чувствительности каждого датчика. Затем каждый датчик выходит на связь с соседними датчиками и по вышеописанному алгоритму определяет часть периметра своей зоны чувствительности, не попавшую в зону чувствительности соседних датчиков. Эта информация передается в пункт наблюдения и контроля, который определяет местоположение частей зоны ответственности мониторинга, не попавших в зону покрытия датчиков.

Любой i -й датчик может быть исключен из сети мониторинга, если периметры соседних с ним датчиков входят в зону чувствительности n датчиков без его участия.

Минимизации зоны нечувствительности в зоне ответственности мониторинга. Целью развертывания сети мониторинга является как обнаружение, так и определение местоположения объекта наблюдения. С учетом этого определим область в зоне ответственности мониторинга, в которой ошибка определения местоположения объекта наблюдения превышает заданную границу как зону нечувствительности.

Определим разрешение сети мониторинга как минимальное расстояние l , такое что сеть мониторинга может различить две точки на плоскости, если расстояние между ними больше, чем l .

В работах [8—10] было доказано, что если ошибка определения местоположения объекта наблюдения имеет верхнюю границу, равную ε , то разрешение сети мониторинга

$$l \leq \sqrt{3} \cdot \varepsilon.$$

Если ошибка определения местоположения объекта наблюдения имеет нижнюю границу, равную ε , то

$$l \geq 2\varepsilon.$$

Рассмотрим, как с помощью датчиков может быть определено местоположение объекта (рис. 5).

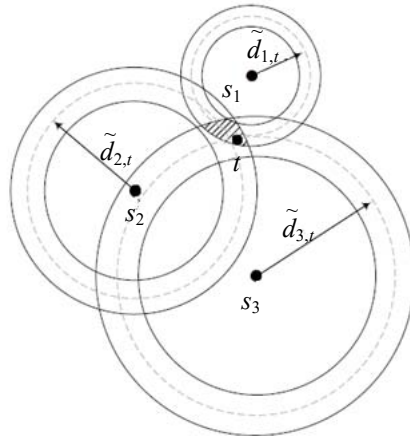


Рис. 5

Оценка определения сенсором s_i евклидова расстояния до наблюдаемого объекта $\tilde{d}_{i,t}$ удовлетворяет неравенству

$$d_{i,t} - e \leq \tilde{d}_{i,t} \leq d_{i,t} + e,$$

где e — ошибка определения местоположения объекта.

Если датчик s_i не может отличить точку t на плоскости от точки t' , то тогда истинное расстояние до точки t' также находится в пределах оценки датчика и разность расстояний $d_{i,t}$ и $d_{i,t'}$ удовлетворяет неравенству

$$-2e \leq d_{i,t} - d_{i,t'} \leq 2e. \tag{3}$$

Неравенство (3) означает, что если расстояние от датчика s_i до точек t и t' различается больше, чем на $2e$, то он может осуществить распознавание точек t и t' (рис. 6). Из неравенства (3) следует

$$d_{i,t'} \leq d_{i,t} + 2e.$$

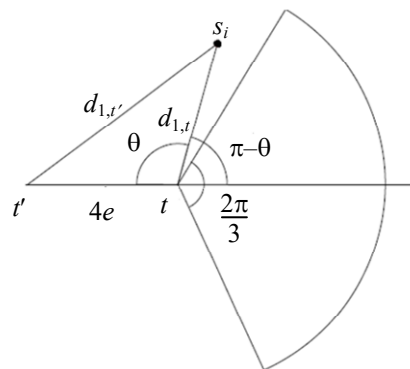


Рис. 6

Найдем угол θ :

$$\cos \theta = \frac{d_{i,t}^2 + (4e)^2 - d_{i,t'}^2}{2d_{i,t}4e} \geq \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}}. \tag{4}$$

При $d_{i,t} \rightarrow \infty$ выражение (4) представляет собой неопределенность вида ∞/∞ , поэтому для нахождения $\lim_{d_{i,t} \rightarrow \infty} \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}}$ воспользуемся правилом Лопиталья:

$$\lim_{d_{i,t} \rightarrow \infty} \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}} = \frac{(12e^2 - 4ed_{i,t})'}{(8ed_{i,t})'} = -\frac{4e}{8e} = -\frac{1}{2}.$$

Поскольку $\cos\theta \geq -1/2$, то нижний предел значения угла $\theta = \arccos(-1/2) = 2\pi/3$, и, следовательно, в случайно выбранном секторе с радиусом r и углом $\theta = 2\pi/3$ должен существовать хотя бы один датчик с разрешением сети мониторинга $l \leq 4e$. Исходя из выражения (1) можно заключить, что если существует хотя бы один датчик в случайно выбранном секторе зоны ответственности мониторинга с центром в точке t , радиусом r и углом $\theta = 2\pi/3$, то ошибка определения местоположения объекта наблюдения с помощью сети мониторинга ограничена сверху величиной

$$\varepsilon = \frac{4\sqrt{3} \cdot e}{3}.$$

Плотность сети мониторинга равна

$$N = n_l / n_d,$$

где n_l и n_d — количество датчиков в сети мониторинга, необходимое соответственно для определения местоположения объекта и его обнаружения.

Относительное разрешение сети мониторинга равно

$$a = l / e.$$

Зависимость, приведенная на рис. 7, позволяет сделать следующий вывод: если требования к разрешению сети близки значению $2e$, то плотность сети быстро растет; при разрешении $l \geq 4e$ плотность сети мониторинга не изменяется, при этом количество датчиков, требуемое для определения местоположения объекта, примерно в четыре раза превышает количество датчиков, необходимых для обнаружения объекта. Радиус зоны чувствительности сенсора при увеличении значения a имеет верхнюю границу, равную $r_b = 0,5r$. Это означает, что при определении местоположения объекта необходимо в зоне ответственности сети мониторинга иметь, по крайней мере, один датчик с зоной чувствительности, равной $r_q = 0,5r$, что согласуется с триангуляционным методом определения местоположения объекта.

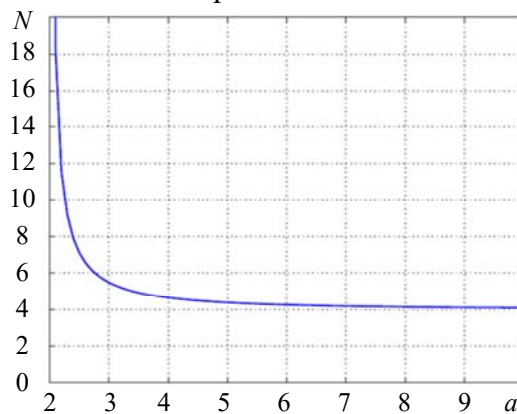


Рис. 7

Как видно из графика, компромиссным решением между величиной разрешения сети мониторинга и плотностью сети является величина $3 \leq a \leq 4$.

Заключение. Представлено решение задачи эффективного расположения на территории акватории порта датчиков различной физической природы, реализующих дистанционную многосенсорную сеть мониторинга. Эффективным расположением считается такое, при котором каждая точка в зоне ответственности находится в зоне чувствительности хотя бы одного датчика и сеть мониторинга способна определить местоположение объекта наблюдения с достаточной точностью.

Предложен алгоритм размещения датчиков в зоне ответственности мониторинга для случая, при котором все датчики характеризуются одинаковой зоной чувствительности, и для случая, при котором датчики характеризуются различной зоной чувствительности.

Предложены выражения для определения плотности сети мониторинга, необходимой для определения местоположения объекта наблюдения с достаточной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В. В. Системы метеорологического, экологического и аэрокосмического мониторинга. М.: Радиотехника, 2015. 184 с.
2. Гурьева М. Н., Журавель Ю. Н., Тишкин Р. В. Алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий в районе их интенсивного хозяйственного использования // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. № 3. С. 223—232. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232.
3. Иванов А. В. Региональный экологический мониторинг эпохи интернета вещей // Управление техносферой. 2018. Т. 1, вып. 2. С. 165—184 [Электронный ресурс]: <<http://f-ing.udsu.ru/technosphere>>, 13.07.2020.
4. Monaldo et al. A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface wind speed // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. Vol. 42. P. 283—290. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817213.
5. Бескид П. П., Богданов П. Ю., Миклуш В. А., Татарникова Т. М., Чернецова Е. А., Шишкин А. Д. Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, проводимых в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 371—391.
6. Кашкаров А. П. Датчики в электронных схемах. От простого к сложному. М.: ДМК Пресс, 2013. 200 с.
7. Чернецова Е. А. Дистанционный мониторинг нефтяных загрязнений в водной среде. СПб: РГГМУ, 2008. 179 с.
8. Dziubenko I. N., Tatarnikova T. M. Algorithm for solving optimal sensor devices placement problem in areas with natural obstacles // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 1—4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604325.
9. Бескид П. П., Шишкин А. Д. Об опыте проведения экологического мониторинга состояния морской поверхности радиолокационными средствами // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2 (122). С. 20—24.
10. Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks // Proc. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP). 2005. P. 793—796. DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.

Сведения об авторах

- Виктория Александровна Миклуш** — РГГМУ, кафедра информационных технологий и систем безопасности; ст. преподаватель; E-mail: miklush-v@yandex.ru
- Татьяна Михайловна Татарникова** — д-р техн. наук, профессор; РГГМУ, Институт информационных систем и геотехнологий; директор; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru
- Иван Иванович Палкин** — канд. воен. наук, доцент; РГГМУ, первый проректор; E-mail: palkin@rshu.ru

Поступила в редакцию
23.01.2021 г.

Ссылка для цитирования: Миклуш В. А., Татарникова Т. М., Палкин И. И. Решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 404—411.

SOLVING THE PROBLEM OF ENVIRONMENTAL MONITORING OF A PORT WATER AREA USING A DISTRIBUTED SYSTEM OF SENSORS**V. A. Miklush, T. M. Tatarnikova, I. I. Palkin***Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, Russia
E-mail: miklush-v@yandex.ru*

A solution to the problem of ecological monitoring of the port water area using a distributed system of sensors of various physical nature with centralized control is presented. The effective location of the sensors in the monitored area must satisfy the requirements of full coverage of the area by the sensor sensitivity zones and the specified accuracy of determining the location of the observation object. An algorithm for determining the coverage area by sensors of the monitoring responsibility area is proposed. Mathematical expressions are given to determine the necessary density of the sensors network.

Keywords: environmental monitoring, port water area, sensors, location geometry, sensor responsibility area, maximum information criterion

REFERENCES

1. Mikhaylov V.V. *Sistemy meteorologicheskogo, ekologicheskogo i aerokosmicheskogo monitoringa* (Systems of Meteorological, Environmental and Aerospace Monitoring), Moscow, 2015, 184 p. (in Russ.)
2. Gurieva M.N., Zhuravel Yu.N., Tishkin R.V. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2016, no. 3, pp. 223–232. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232.
3. <http://f-ing.udsu.ru/technosphere>. (in Russ.)
4. Monaldo et al. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, vol. 42, pp. 283–290. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817213.
5. Beskid P.P., Bogdanov P.Yu., Miklush V.A., Tatarnikova T.M., Chernetsova E.A., Shishkin A.D. *Hydrometeorology and Ecology*, 2020, no. 60, pp. 371–391. (in Russ.)
6. Kashkarov A.P. *Datchiki v elektronnykh skhemakh. Ot prostogo k slozhnomu* (Sensors in Electronic Circuits. From Simple to Complex), Moscow, 2013, 200 p. (in Russ.)
7. Chernetsova E.A. *Distantionnyy monitoring neftnykh zagryazneniy v vodnoy srede* (Remote Monitoring of oil Pollution in the Aquatic Environment), St. Petersburg, 2008, 179 p. (in Russ.)
8. Dziubenko I.N., Tatarnikova T.M. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604325.
9. Beskid P.P., Shishkin A.D. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2011, no. 2(122), pp. 20–24.
10. Krishnamurthy V. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)*, 2005, pp. 793–796. DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.

Data on authors

- Viktoria A. Miklush** — Russian State Hydrometeorological University, Department of Information Technology and Security Systems; Senior Lecturer; E-mail: miklush-v@yandex.ru
- Tatiana M. Tatarnikova** — Dr. Sci., Professor; Russian State Hydrometeorological University, Institute of Information Systems and Geotechnologies; Head of the Institute; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru
- Ivan I. Palkin** — PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University, First Vice-Rector; E-mail: palkin@rshu.ru

For citation: Miklush V. A., Tatarnikova T. M., Palkin I. I. Solving the problem of environmental monitoring of a port water area using a distributed system of sensors. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 5. P. 404–411 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-404-411